



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**CFD ANALÝZA TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ TRUBKOVNICE**

CFD ANALYSIS OF THERMAL STRESS OF A TUBESHEET

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Vince**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Miroslav Rebej**

**BRNO 2021**



# Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Tomáš Vince**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Rebej**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## CFD analýza tepelného zatížení trubkovnice

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U zařízení na výměnu tepla je důležité zabezpečit rovnoměrné rozložení teplot. V případě výrazného lokálního tepelného zatížení jednotlivých částí zařízení může dojít k poškození konstrukce anebo k různým provozním problémům. Zaměřením této práce bude analyzovat tepelné zatížení trubkovnice v rámci konkrétní průmyslové aplikace. Tepelné zatížení bude analyzováno prostřednictvím simulace proudění CFD softwarem ANSYS Fluent. Provedená práce tak bude sloužit jako náhled k možným příčinám provozních problémů a poukáže na místa, kde může být potřeba nějakých konstrukčních úprav.

### Cíle diplomové práce:

- 1) Seznámit se s problematikou vícefázového proudění tekutin a provést rešerši CFD prací se zaměřením na modelování vícefázového proudění (voda–pára) s přítomností varu
- 2) Popsat provozní podmínky a nastavení výpočtového modelu spolu s hlavními použitými aproximacemi
- 3) Provést CFD simulaci proudění a výsledky vyhodnotit z hlediska tepelného zatížení trubkovnice
- 4) Na základě získaných výsledků diskutovat možné úpravy a řešení provozních problémů

### Seznam doporučené literatury:

ANSYS FLUENT Documentation, Ansys Inc. (latest version)

TONG, L.S. and TANG, Y.S., Boiling Heat Transfer And Two-Phase Flow. Taylor & Francis. Series in chemical and mechanical engineering. ISBN 978-1-56032-485-0 1997

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou viacfázového prúdenia v parnom generátore ako jednou z možných príčin praskania zvarov trubiek a trubkovnice. V úvode práce je spracovaná rešerš popisujúca var a jav dvojfázového prúdenia v technickými aplikáciách, jeho charakteristiky a vlastnosti. Ďalej je spracovaný prehľad dostupných výpočtových viacfázových modelov v programe ANSYS Fluent 2021 R1 a rešerš doposiaľ publikovaných prác zameraných na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu. Nasleduje popis predmetného kotla, ktorý je súčasťou prevádzky na výrobu kyseliny dusičnej v chemickom podniku DUSLO, a.s., jeho prevádzkových podmienok a detailnejší popis problému riešeného v rámci tejto diplomovej práce. V ďalšej časti práce je popis výpočtového modelu, vrátane popisu geometrie modelu a použitých zjednodušení, výpočtovej siete a okrajových podmienok. Nasleduje popis nastavenia steady-state a tranzientných CFD simulácií v programe ANSYS Fluent 2021 R1. Na záver sú uvedené výsledky výpočtu dvojfázového prúdenia, ktoré sú následne diskutované v závere.

## Kľúčové slová

CFD, var, dvojfázový tok, kotol, parný generátor, objemový zlomok, viacfázový model toku, ANSYS Fluent

## Abstract

This diploma thesis focuses on the phenomena of multiphase flow in a steam generator as a one of probable causes of tubes and tubesheet weld cracking. In the first part of the work, a research was carried out focusing on the boiling and the phenomenon of two-phase flow in technical applications, its characteristics and properties. The thesis continues with an overview of available numerical multiphase models in the ANSYS Fluent 2021 R1 and a research of previously published works focused on two-phase flow with the presence of boiling. The research is followed by a description of the particular boiler, which is part of the nitric acid production plant in the chemical company DUSLO, a.s., its operating conditions and a more detailed description of the issue that is being addressed in this thesis. The second part of the work continues with a description of the computational model, including a description of the geometry of the model and used simplifications, the computational mesh and the description of boundary conditions. Important part is the description of calculation setting of steady-state and transient CFD simulations in ANSYS Fluent. Finally, the results of the two-phase flow calculation are presented and then discussed in the conclusions.

## Keywords

CFD, boiling, two-phase flow, boiler, steam generator, volume fraction, multiphase flow model, ANSYS Fluent



---

**BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

VINCE, Tomáš. *CFD analýza tepelného zatřžení trubkovnice*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132873>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Rebej.





## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce Ing. Miroslava Rebeja a konzultantov Ing. Gabriela Zsilinszkého a Michala Geschwandtnera, za použitia odbornej literatúry a technických dokumentácií uvedených v zozname.

V Brne 21.5.2021

---

Tomáš Vince



---

## POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu svojej práce Ing. Miroslavovi Rebejovi a konzultantom Ing. Gabrielovi Zsilinszkému a Michalovi Geschwandtnerovi za vynaložený čas a odborné vedenie pri vypracovávaní diplomovej práce. Ďalej sa chcem poďakovať svojej rodine za podporu počas celého štúdia.

---

podpis



## Obsah

Úvod .....	1
1 Var .....	3
1.1 Fyzika varu .....	3
1.2 Režimy varu .....	3
2 Dvojfázový tok .....	5
2.1 Režimy dvojfázového prúdenia .....	5
2.1.1 Režimy dvojfázového prúdenia v adiabatickom toku .....	5
2.1.2 Režimy dvojfázového prúdenia v diabatickom toku .....	8
3 Modelovanie dvojfázového prúdenia s prítomnosťou varu .....	11
3.1 Výpočtová sieť pre CFD výpočet .....	11
3.2 Modelovanie viacfázového toku v programe ANSYS Fluent .....	12
3.2.1 Model objemu kvapaliny VOF .....	13
3.2.2 Model zmesi – mixture .....	13
3.2.3 Eulerovský model .....	13
3.3 Modelovanie varu v programe ANSYS Fluent .....	13
3.3.1 Výparne–Kondenzačný model .....	13
3.3.2 Model stenového varu .....	14
3.4 Štúdie zamerané na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu .....	15
4 Parný generátor na prevádzke KD3 .....	21
4.1 Príprava vzducho–čpavkovej zmesi .....	21
4.2 Spaľovanie a tvorba dusíkatých plynov .....	21
4.3 Generátor pary .....	24
4.4 Vrchná trubkovnica a oblasť outletu .....	25
4.5 Spojenie trubiek a trubkovnice .....	27
4.5.1 Chybné prevedenie zvarov .....	27
4.5.2 Schéma poškodených trubiek .....	28
5 Výpočtový model .....	31
5.1 Model Geometrie .....	31
5.1.1 Tvorba 3D modelu v programe SOLIDWORKS .....	31
5.1.2 Úprava 3D modelu v programe SpaceClaim .....	33
5.2 Výpočtová sieť .....	35
5.2.1 Tvorba výpočtovej siete vo Fluent Meshing .....	35

---

5.3	Materiálový model .....	42
5.4	Okrajové podmienky výpočtu .....	42
6	Numerické analýzy .....	45
6.1	Steady-state výpočty .....	45
6.1.1	Výsledky steady-state výpočtov .....	47
6.2	Dvojfázový model .....	52
6.2.1	Nastavenie Eulerovského viacfázového modelu .....	53
7	Výsledky výpočtu .....	55
	Záver .....	61
	Zoznam použitých zdrojov .....	63
	Zoznam použitých obrázkov .....	67
	Zoznam použitých tabuliek .....	69
	Zoznam použitých skratiek a symbolov .....	71
	Zoznam použitých značiek chemických prvkov a zlúčenín .....	73
	Zoznam príloh .....	75

## Úvod

U zariadení na výmenu tepla je dôležité zabezpečiť rovnomerné rozloženie teplôt. V prípade výrazného lokálneho tepelného zaťaženia jednotlivých častí zariadenia môže dôjsť k poškodeniu konštrukcie alebo k rôznym prevádzkovým problémom. Zameraním tejto diplomovej práce bude analyzovať tepelné zaťaženie trubkovnice parného generátora, ktorý je súčasťou kotla na prevádzke výroby kyseliny dusičnej (ďalej iba „KD3“) v chemickej spoločnosti DUSLO, a.s. Tepelné zaťaženie bude analyzované prostredníctvom simulácie prúdenia CFD softwarom ANSYS Fluent [1].

Práca sa bude sústreďovať na oblasť vrchnej trubkovnice konkrétneho vertikálneho parného generátora. Týmto generátorom je výmenník tepla, v ktorom dochádza k fázovej premene teplotného média, v tomto prípade vody, z kvapalnej fázy na plynnú. V oblasti vrchnej trubkovnice dochádza k zlyhávaniu zvarových spojov spájajúcich trubky a trubkovnicu. Ilustračné snímky sú k dispozícii v Prílohe 1. Jednou z príčin môže byť nerovnomerná či nadmerná produkcia parnej fázy v tesnej oblasti pod trubkovnicou. Táto oblasť, ako bude ďalej ilustrované v práci, má špecifickú geometriu a je vybavená samostatným potrubím pre chladenie a ochranu trubkovnice. Týmto potrubím je privedená chladiaca voda špeciálne určená na chladenie trubkovnice a od zvyšku výmenníka je táto oblasť oddelená deliacim plechom. Prúdy sa spájajú v úzkom kanáli po obvode trubkovnice a zariadenie opúšťajú prostredníctvom výtokov (z angl. „outlet“).

Cieľom práce teda je zoznámiť sa s javom dvojfázového prúdenia a so zmenami spôsobenými varom pri takomto prúdení. Ďalej sú predstavené súčasné poznatky v CFD modelovaní takéhoto prúdenia. Následne je uvedený riešený problém, popísané prevádzkové podmienky v technológií a na základe získaných informácií nastavený výpočtový model. V ďalšej časti tejto diplomovej práce bol vykonaný CFD výpočet v programe ANSYS Fluent, ktorého výsledky sú vyhodnotené. V závere práce sú diskutované možné príčiny problému a eventuálne jeho riešenia. Práca tak môže slúžiť ako náhľad k možným príčinám prevádzkových problémov a poukázať na miesta, kde môžu byť potrebné konštrukčné úpravy.





# 1 Var

Var je definovaný ako spôsob prestupu tepla, pri ktorom dochádza k fázovej premene teplotného média z kvapalnej fázy na plynú. Nasledujúca kapitola vychádza zo zdroja [2].

## 1.1 Fyzika varu

Rozlišujú sa dva základné typy varu – tzv. *objemový var* (z angl. „*pool boiling*“) a *prietokový var* (z angl. „*flow boiling*“). Objemový var prebieha, keď je výhrevná plocha ponorená v určitom objeme kvapaliny, ktorá je v kľude. Prietokový var prebieha v prúde pohybujúcej sa kvapaliny, kde výhrevnou plochou môže byť stena ohraničujúca daný tok. Tento typ varu, keďže je zložený zo zmesi kvapalnej a plynnej fázy, je typom dvojfázového prúdenia, ktorému sa ďalej venuje táto práca.

## 1.2 Režimy varu

Literatúra rozlišuje niekoľko režimov alebo fáz pre oba typy varu, dôležitý je ale vplyv samotného prúdenia. Pri objemovom vare sú dôležité vztlakové sily, zatiaľ čo u prietokového má veľký význam efekt nútenej konvekcie v tokovom kanále.

Pri prestupe tepla sa kvapalina okolo steny začína prehrievať a na miestach ako sú jemné kavity alebo ryhy sa začnú tvoriť zárodoky bubliniek, tzv. nukleáty. Bublínky prenášajú výparné teplo fázovej premene a zvyšujú konvekciu miešaním kvapaliny v blízkosti teplovýmennej plochy. Tento typ varu je špecifický pomerne veľkým prestupom tepla i pri malej teplotnej diferencii. Avšak tepelný tok nemôže byť zvyšovaný do nekonečna. Keď sa vytvorí príliš veľké množstvo bubliniek pri určitej vysokej hodnote tepelného toku, začnú tvoriť prekážku pre tok kvapaliny. Pary vytvoria na teplovýmennej ploche izolačnú vrstvu a zvýšia tak povrchovú teplotu, čo má za následok jav nazývaný *kríza varu* (z angl. „*boiling crisis*“). S ním spojená je aj hodnota tepelného toku dosiahnutá tesne pred krízou, konkrétne ide o *kritický tepelný tok* (z angl. „*critical heat flux*“). Ten sa vyskytuje ako v objemovom vare, tak i v rôznych režimoch prietokového varu.

Po dosiahnutí kritického tepelného toku sa var stáva nestabilným a dochádza k tzv. *čiasťonému varu v tenkej vrstve* (z angl. „*partial film boiling*“) alebo *prechodovému varu* (z angl. „*transition boiling*“). Je charakteristický osciláciou teploty teplovýmennej plochy a následne k jej náhlemu nárastu pri stálom tepelnom výkone. Postupne sa vytvára stabilná vrstva pary a rýchlosť prestupu tepla dosahuje maximum. Toto štádium sa označuje ako *stabilný var v tenkej vrstve* (z angl. „*stable film boiling*“). Ďalším zvyšovaním teploty teplovýmennej plochy sa teoreticky zvyšuje i rýchlosť prestupu tepla, avšak môže v tomto prípade už dôjsť k poškodeniu steny. Teplota je teda obmedzená materiálovými vlastnosťami teplovýmennej plochy.

Vyššie uvedené režimy sa vyskytujú v oboch základných typoch varov, avšak prietokový var je ešte komplexnejší z dôvodu dvojfázového prúdenia. Šmykové sily vytvorené prúdením strhávajú bublinky zo steny kanálu a znižujú priemernú veľkosť bublín a zvyšujú ich frekvenciu.



## 2 Dvojfázový tok

Medzi najčastejšie príčiny skúmania dvojfázového prúdenia možno zaradiť potrebu kvantifikácie prestupu tepla a tlakové straty daného prúdenia. Jednou zo zásadných okrajových podmienok pri takejto úlohe je teda prestup tepla, resp. skutočnosť, či sa jedná o diabatický alebo adiabatický dej. Pri diabatickom toku sa totižto jedná o zložený termo-hydrodynamický dej. Prestup tepla vyvoláva jednak zmenu fáze a s tým spojené zmeny v jej distribúcií v doméne i v samotnom režime prúdenia a súčasne ovplyvňuje aj hydrodynamické charakteristiky, ako tlakovú stratu a pod. Jednozložkový dvojfázový tok sa dokáže plne vyvinúť pri nízkych tlakoch len zriedkavo kvôli zmene tvaru veľkých bublín a zmene tlaku pozdĺž tokového kanálu, ktorá neustále mení stav kvapaliny a teda mení i distribúciu fáze. Tieto pozorovania naznačujú veľmi vysokú komplexnosť diabatického dvojfázového toku a poukazujú na to, že popis prúdenia v nejakom bode domény v čase nie je dostatočný bez uvažovania predchádzajúcich stavov v danom bode a všeobecne bez poznania daného toku. Ďalším problémom pri takto komplexnom jave môžu byť hydrodynamické nestability, či nestability v termodynamickej rovnováhe. Možno teda konštatovať, že dvojfázový tok s prítomnosťou prestupu tepla alebo varu je skutočne náročnou disciplínou pre modelovanie a mnoho jeho oblastí nie je do dnešného dňa popísaných. [2]

Dvojfázový tok má rozsiahle využitie v priemyselných procesoch, predovšetkým vo výmenníkoch tepla so zmenou fáze. Kvôli medzifázovým interakciám, prestupu hmoty, prestupu energie a hybnosti medzi dvoma fázami, je dvojfázový tok so zmenou fáze veľmi komplikovaná záležitosť. [3]

### 2.1 Režimy dvojfázového prúdenia

Typy dvojfázového prúdenia sú charakterizované distribúciou bublín v doméne. Medzi základné módy patria bubliny suspendované v kvapalnom prúde, kvapalné častice suspendované v prúde pár alebo obe fáze vyskytujúce sa prerušovane. Kombinácie týchto módov sa nazývajú *režimy prúdenia* (z angl. „*flow patterns*“). Kapitola čerpá zo zdroja [2, 4].

#### 2.1.1 Režimy dvojfázového prúdenia v adiabatickom toku

Rozlišuje sa niekoľko režimov dvojfázového prúdenia v adiabatickom toku. Niektoré režimy sa vyskytujú iba v prípade vertikálneho smeru prúdenia, väčšinu však možno nájsť ako pri vertikálnom, tak i pri horizontálnom prúdení. Jednotlivé typy možno vidieť na Obr. 1.

*Bublínkový tok* (z angl. „*bubbly flow*“) je režim, pri ktorom sa plynná fáza pohybuje cez doménu vo forme izolovaných bubliniek. Tento režim možno pozorovať pri nízkej hodnote objemového zlomku plynnej fáze.

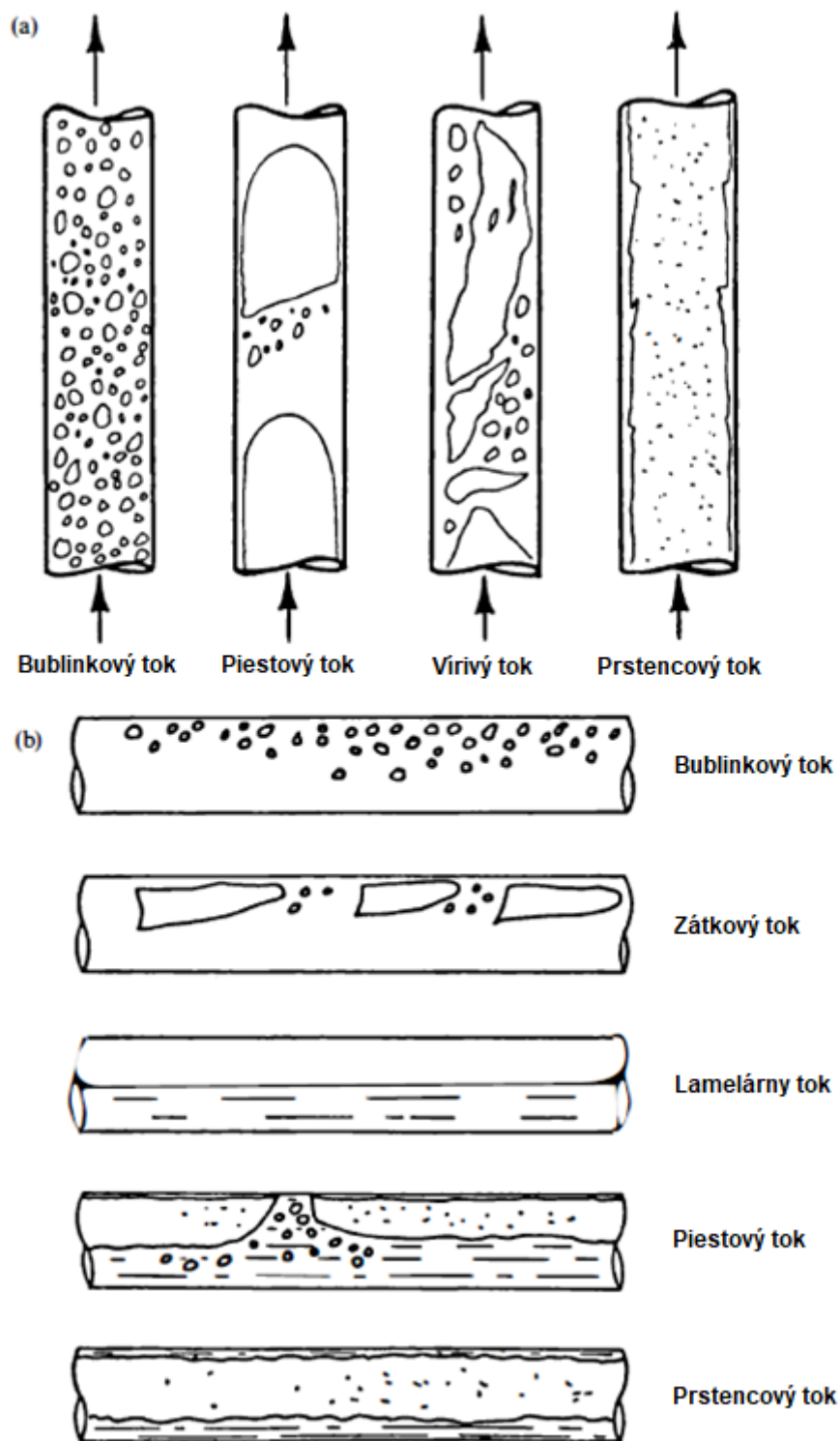
*Piestový tok* (z angl. „*slug flow*“) je režim, u ktorého je potrebné rozlišovať, či sa jedná o vertikálne alebo horizontálne prúdenie. V prípade vertikálneho smeru sú typické bubliny s priemerom podobným priemeru samotného potrubia s oblým profilom vpredu, ktoré sa doménou pohybujú oddelené „piestami“ kvapaliny. Tie môžu obsahovať disperziu menších bublín. V prípade horizontálneho smeru prúdenia sa veľké „piesty“ kvapaliny pohybujú medzi bublinami druhej fáze, ktorých veľkosť zodpovedá priemeru potrubia. V takomto toku sa vytvárajú nestability z dôvodu rozdielnej hustoty a stlačiteľnosti jednotlivých sekcií. Vyskytuje sa pri nižších rýchlostiach a označuje sa ako začiatok prechodu medzi bublínkovým a prstencovým tokom.

*Zátkový tok* (z angl. „*plug flow*“) možno pozorovať v horizontálnom prúdení. Je charakteristický podlhovastým tvarom bublín a často je zamieňaný za piestový tok, avšak tieto možno jasne rozlíšiť na základe tvaru plyných kavít alebo pozorovaním tzv. schodovitých hydraulických zmien.

*Vírivý tok* (z angl. „*churn flow*“) vzniká zvyšovaním rýchlosti plynnej fáze, kedy sa piestový tok a jeho bubliny stávajú nestabilnými, vedúc k osciláciám a múteniu domény. Označuje sa aj ako nestabilný piestový tok.

*Nedokonalý prstencový tok* (z angl. „*wispy annular flow*“) je tvorený zo súvislej vrstvy kvapaliny na stene kanála s relatívne nízkou rýchlosťou prúdenia a z unášanej fázy v jadre toku s vysokou rýchlosťou. Od vyvinutého prstencového toku sa odlišuje štruktúrou unášanej fáze, ktorá má v tomto prípade tendenciu zoskupovať sa do veľkých zhlukov.

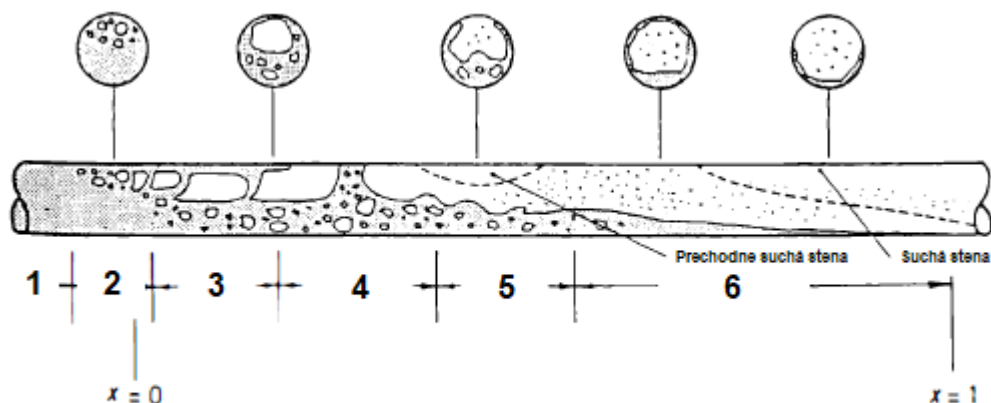
*Prstencový tok* (z angl. „*annular flow*“), ako názov prezrádza, sa vyznačuje súvislou vrstvou kvapaliny v tvare prstenca obliehajúceho stenu potrubia spoločne so súvislou vrstvou plynnej fáze v jadre toku. Jadro môže obsahovať dispergované kvapôčky, resp. oblasť prstenca môže obsahovať bublinky plynu. Tento režim prúdenia možno očakávať pri vysokej hodnote objemového zlomku plynnej fáze a vysokých rýchlostiach. Špeciálnym prípadom prstencového toku je prípad, kde plyná fáza tvorí prstenec/jemný film na stene kanála a jadro je tvorené kvapalinou. Tento režim sa nazýva *inverzný prstencový tok* a vyskytuje sa iba v prípade podchladeného varu v tenkej vrstve.



Obr. 1 - Režimy dvojfázového prúdenia vo vertikálnom toku (a) a v horizontálnom toku (b) [2]

### 2.1.2 Režimy dvojfázového prúdenia v diabatickom toku

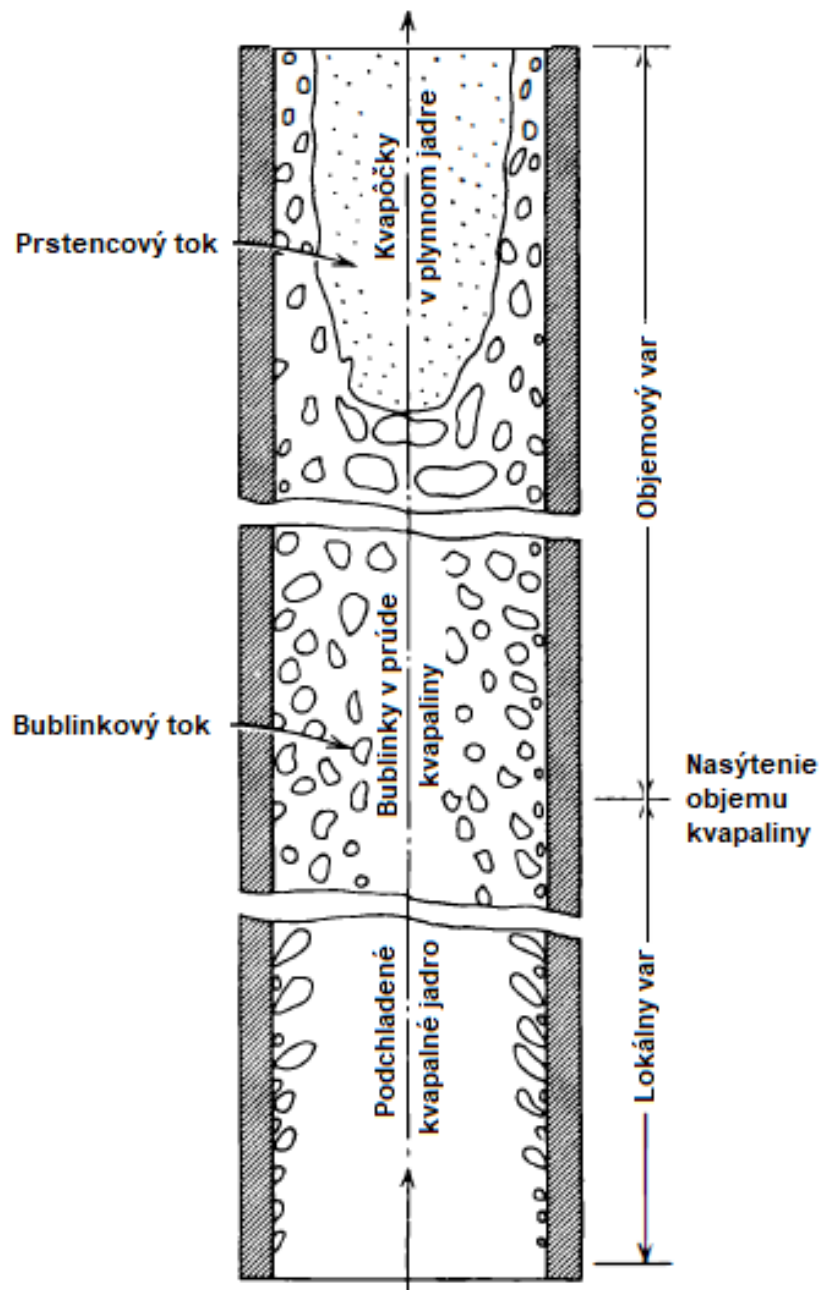
Vo všeobecnosti nemožno s určitosťou povedať, že režimy prúdenia v diabatickom toku sú rovnaké, resp. majú rovnaké charakteristiky ako v diabatickom. Obr. 2 ilustruje prechody medzi režimami v diabatickom prúdení.



Obr. 2 - Režimy prúdenia v diabatickom toku  
(1 – jednofázová kvapalina, 2 – bublinkový tok; 3 – zátkový tok; 4 – piestový tok;  
5 – vlnivý tok; 6 – prstencový tok) [2]

V prúdení s prítomnosťou varu sa objemový podiel plynnej fázy zvyšuje, ako postupuje ďalej tokovým kanálom, následkom čoho sa adekvátne menia aj režimy prúdenia a sú odlišné od tých pozorovaných v diabatickom toku.

Obr. 3 znázorňuje vývoj prúdenia pri vysokej rýchlosti smerom nahor vo vertikálnom kanáli, v ktorom dochádza k varu kvapaliny. V sekcii lokálneho varu sa na počiatku vytvorí vrstva prehriatej kvapaliny na stene kanála, zatiaľ čo objem v jadre môže byť podchladený. V tejto vrstve dochádza k tvorbe zárodkov a rastu bublín. Bezprostredne pod ňou sa nachádza dvojfázová bublinková vrstva. Tá obsahuje bublinky rôznej veľkosti, buď stále prichytené na stene, alebo už unášané prúdom, ktoré sú v procese rozpadu kvôli rekondenzácii. Následne dochádza k objemovému varu. Ten sa objavuje, keď sa bublinky okrajovej vrstvy vyvinuli natoľko, že vyplňajú jadro toku a celý objem kvapaliny dosiahol úroveň saturácie. V tejto sekcii sa rozlišujú dva dôležité režimy – bublinkový tok a prstencový tok. Môže sa vyvinúť i piestový tok, no iba za veľmi špecifických podmienok a reálne len v malom percente prípadov. V bublinkovom toku sú bublinky rovnomerne rozložené v nasýtenej kvapaline. Prehriata vrstva na ohrievanej stene je stále prítomná a dodáva toku bublinky pary, ktoré sa už ale v tomto prípade nerozpadajú. Ako sa zvyšuje objemový podiel plynnej fázy, bublinky sa viac koncentrujú v jadre toku, kde sú najvyššie rýchlosti – Bernoulliho efekt. To samozrejme vedie k tvorbe prstencového toku, kde majoritné množstvo kvapaliny tvorí prstenec okolo steny kanála a zvyšok je dispergovaný vo forme kvapôčok v plynnom jadre. Vo vertikálnom toku sa prstencový tok často označuje aj ako stúpajúci tok tenkej vrstvy.



Obr. 3 - Režimy prúdenia vo vertikálnom ohrievanom kanále [2]





### 3 Modelovanie dvojfázového prúdenia s prítomnosťou varu

Modelovanie dvojfázového toku je stále vyvíjajúcou sa disciplínou. Používanie rigorózných matematických modelov v kombinácii s pokročilými výpočtovými technikami a experimentami v tejto oblasti umožnili zásadný posun v porozumení a predvídaní javov spojených s interakciou dvoch fáz. Vznikli 2 základné prístupy pre popis dvojfázových modelov – homogénny model a model oddelených fáz. Prvý je vhodný predovšetkým na premiešané toky ako bublinkový alebo piestový, zatiaľ čo druhý uvedený je vhodný pre prúdenie s oddelenými fázami, ako napríklad v prstencovom toku. [2]

#### 3.1 Výpočtová sieť pre CFD výpočet

Nasledujúca kapitola vychádza primárne zo zdrojov [5, 6].

Parciálne diferenciálne rovnice popisujúce mechaniku tekutín a prestup tepla zvyčajne nie sú vhodné pre analytické riešenie, výnimkou sú jedine veľmi jednoduché prípady. Je preto potrebné skúmanú doménu rozdeliť na menšie subdomény tvorené základnými geometrickými tvarmi, ako sú šesťsteny alebo štvorsteny pri 3D úlohách, resp. šesťhrany, štvoruholníky alebo trojuholníky pri 2D úlohách. Riadiace rovnice sú potom diskretizované a riešené pre každú takúto subdoménu zvlášť. V praxi sa využívajú 3 metódy riešenia systému týchto rovníc. Je to metóda konečných prvkov, metóda konečných objemov a metóda konečných rozdielov. Zvláštny dôraz musí byť kladený na spojitosť výsledkov riešenej úlohy na rozhraní jednotlivých subdomén, aby bolo možné zlúčiť čiastkové výsledky a získať tak ucelený obraz o prúdení v plnej doméne. Takéto subdomény sa nazývajú prvky, resp. bunky a ich kolekcia sa nazýva výpočtová sieť. Kvalita siete bola v minulosti výrazným problémom v procese analýzy, pretože neboli dostupné prostriedky pre plne automatické generovanie takejto siete. S vývojom techniky boli vytvorené aj špecializované sieťovacie programy. Dnes je obecné známe, že prístup ku kvalitnému programovému balíku, ale aj odbornosť pri jeho používaní sú nevyhnutnými predpokladmi pre úspešnú a kvalitnú simuláciu.

Z hľadiska prepojenia jednotlivých elementov existujú siete štruktúrované, neštruktúrované a hybridné. U štruktúrovaných sietí je spojenie jednotlivých buniek pravidelné a možno pozorovať určitý vzorec. Takéto usporiadanie možno dosiahnuť iba použitím štvoruholníkových, resp. šesťstenných elementov pri 2D, resp. 3D úlohách. Neštruktúrované siete nie sú vyjadrené ako dvoj či trojrozmerné pole v pamäti počítača. Tým je umožnené použiť akýkoľvek typ elementu v riešiči, avšak nároky na pamäť sú v porovnaní so štruktúrovanou sieťou omnoho vyššie, keďže spojenie susedných buniek musí byť explicitne uložené. Hybridná sieť je akýmsi medzistupňom medzi štruktúrovanou a neštruktúrovanou sieťou. Obsahuje časti, zväčša uprostred voľného objemu, ktoré sú štruktúrované a časti neštruktúrované, zväčša okolo stien domény.

Pri CFD výpočtoch je veľmi dôležité správne popísať tzv. „boundary layer“, teda medznú vrstvu v okolí steny domény. Výpočtová sieť by preto mala byť vytvorená takým spôsobom, aby získané výsledky čo najpresnejšie popisovali túto oblasť. Zavádza sa bezrozmerná veličina nazývaná  $y^+$  vyjadrujúca rozmer prvej bunky na stene. Pre turbulentné prúdenie je hodnota  $y^+$  definovaná podľa vzorca (1):

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad [-] \quad (1)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

- $u_*$     trecia rýchlosť na stene [m/s]
- $y$      vzdialenosť od steny domény [m]
- $\nu$      lokálna kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]

Hodnota trecej rýchlosti  $u_*$  závisí na hustote kvapaliny a šmykovom napätí na stene domény a v konečnom dôsledku teda na rýchlosti prúdenia a Reynoldsovom čísle. Hodnotu strihového napätia možno len s ťažkosťou určiť priori výpočtu, zvyčajne je potrebné hodnotu odhadnúť a skontrolovať po priebehu simulácie.

### 3.2 Modelovanie viacfázového toku v programe ANSYS Fluent

Z fyzikálneho hľadiska sú základnými fázami hmoty pevná fáza, kvapalná fáza a plynná fáza. Vo viacfázovom prúdení sa však pojem fáza používa v o niečo širšom zmysle. Pri popise viacfázového prúdenia možno fázou definovať ako identifikovateľnú triedu hmoty, ktorá vykazuje určitú zotrvačnú odozvu na prúdenie a interaguje s ním. Napríklad rôzne veľké častice rovnakého tuhého materiálu možno považovať za rôzne fázy, pretože každá kolekcia častíc tej istej veľkosti bude mať podobnú dynamickú odozvu na prietokové pole. Podľa charakteru fázy sa rozlišuje niekoľko režimov viacfázového prúdenia. Táto práca sa ďalej bude zameriavať na režim s rozhraním plyn-kvapalina. Táto kapitola čerpá poznatky zo zdrojov [7] a [8].

Prvým krokom pri riešení viacfázovej úlohy je určiť, ktorý z režimov prúdenia popísaných v kapitole 2, bude dominantný pre danú úlohu. Pokroky vo výpočtovej technike a modelovaní vytvárajú základ pre lepši náhľad do dynamiky viacfázového prúdenia. V súčasnosti existujú 2 prístupy pre numerické výpočty viacfázových úloh:

- Euler-Lagrange prístup
- Euler-Euler prístup

Euler-Lagrange kombinuje eulerovský prístup kontinuálnej fázy s Lagrangeovským modelom diskretnej fázy. Ku kvapalnej fáze pristupuje ako ku kontínuu riešením Navier-Stokesových rovníc, zatiaľ čo dispergovaná fáza je riešená sledovaním veľkého počtu častíc, bublín alebo kvapôčok cez výpočtové pole. Tento prístup môže byť značne zjednodušený, pokiaľ sa neuvažujú interakcie častica-častica, čo si však vyžaduje, aby sekundárna dispergovaná fáza predstavovala len malý objemový zlomok. Trajektórie častíc sú dopočítavané individuálne v špecifikovaných intervaloch v priebehu výpočtu kvapalnej fázy. Tento prístup je predovšetkým teda vhodný pre modelovanie sprejov alebo spaľovania uhlia či kvapalného paliva, avšak nevhodný pre modelovanie zmesí kvapalina-kvapalina, fluidných lôží alebo na aplikácie, kde skrátka objemový zlomok sekundárnej fázy nemôže byť zanedbaný.

Euler-Euler pristupuje k rozdielnym fázam ako k vzájomne sa prenikajúcim kontinuám. Keďže objem jednej fázy nemôže byť vyplnený inou fázou, zavádza sa koncept fázového objemového zlomku. Tieto zlomky sú uvažované ako spojité funkcie priestoru a času a ich suma je rovná jednej. Transportné rovnice pre každú fázou sú odvodené za účelom získania množiny rovníc, ktoré majú podobnú štruktúru pre všetky fázy. Tieto rovnice sú ukončené poskytnutím konštitutívnych vzťahov, ktoré sú získané z empirických poznaní, alebo v prípade granulárnych tokov, pomocou aplikácie kinetickej teórie. V programe ANSYS Fluent sú k dispozícii tri rôzne viacfázové modely Euler-Euler:

- model objemu kvapaliny (z angl. „volume of fluid“ (VOF))
- model zmesi (z angl. „mixture model“)
- Eulerovský model

### 3.2.1 Model objemu kvapaliny VOF

VOF model využíva techniku povrchového sledovania aplikovanú na eulerovskú sieť, inými slovami sleduje medzifázové rozhranie. Bol navrhnutý pre dve alebo viac nemiesiteľných tekutín, kde sa pozornosť výpočtu sústreďuje práve na medzifázové rozhranie. Obe tekutiny zdieľajú rovnice hybnosti a objemový zlomok každej z nich v jednotlivých bunkách výpočtovej siete je zaznamenávaný v celej doméne. Typické aplikácie zahŕňajú predpoveď rozpadu lúčov trysiek, pohyb veľkých bublín v kvapaline, pohyb kvapaliny po pretrhnutí hrádze či ustálené alebo časovo premenné sledovanie ľubovoľného rozhrania kvapalina-plyn.

### 3.2.2 Model zmesi – mixture

Model zmesi je zjednodušený multifázový model, ktorý môže byť použitý v rôznych aplikáciách. Dokáže modelovať n-fáz riešením rovníc hybnosti, kontinuity a energie pre zmes látok, rovnice objemového zlomku pre sekundárnu fázu a algebraické výrazy pre relatívne rýchlosti. Príkladom môže byť úloha, kde je potrebné modelovať viacfázové prúdenie s rozličnou rýchlosťou jednotlivých fáz pri uvažovaní lokálnej rovnováhy na malej priestorovej škále. Ďalej môže byť použitý pri modelovaní homogénnych viacfázových tokov s veľmi silným prepojením a fázami o rovnakej rýchlosti alebo pre výpočet newtonovskej viskozity. Typické aplikácie zahŕňajú sedimentáciu, cyklónové separátory či bublinkové toky, kde objemový zlomok plynnej fáze dosahuje nízkych hodnôt. Model zmesi je vhodnou náhradou eulerovského modelu vo viacerých prípadoch, kedy jednoduchší model môže dosahovať rovnakej presnosti ako komplexnejší viacfázový model, ale s riešením menšieho počtu premenných.

### 3.2.3 Eulerovský model

Eulerovský model je najkomplexnejší z dostupných viacfázových modelov v ANSYS Fluent a vykazuje vysokú mieru rozmanitosti nastavenia. To si však vyžaduje i vyššiu odbornosť v oblasti matematiky i samotného viacfázového prúdenia. Z matematického hľadiska rieši množinu n-rovníc hybnosti a kontinuity pre každú fázu. Umožňuje modelovanie viacerých separátnych, no stále navzájom sa ovplyvňujúcich fáz. Počet fáz, ktoré tento model dokáže riešiť, je v skutku obmedzený iba veľkosťou dostupnej pamäte a konvergenciou danej úlohy. Pri takto komplexných úlohách sa však môžu vyskytovať problémy s priebehom rezíduí a samotnou konvergenciou úlohy. Tento model uvažuje jedno tlakové pole pre všetky fáze.

## 3.3 Modelovanie varu v programe ANSYS Fluent

Modelovanie prestupu tepla pri vare je dôležité vo viacerých priemyselných odvetviach, od automobilového, ktoré využíva pomerne nízke tlaky, až po vysoko-tlaké aplikácie v jadrovej energetike. Bolo vytvorených viacero modelov pre simulovanie tohto javu. Táto kapitola čerpá zo zdroja [7].

### 3.3.1 Výparne–Kondenzačný model

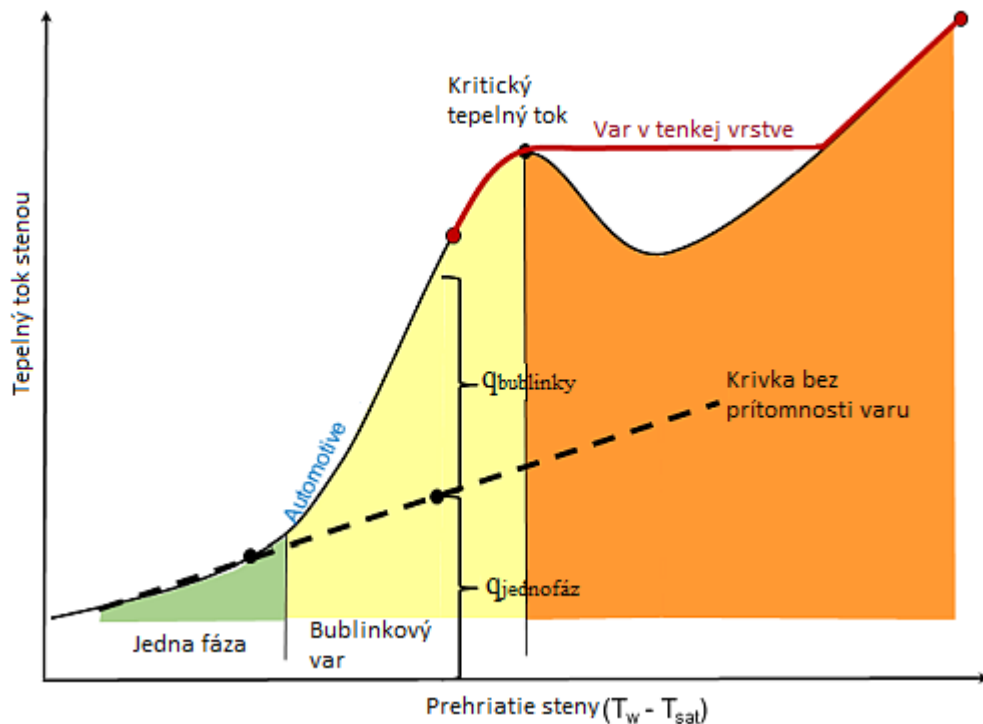
V programe ANSYS Fluent možno použiť jeden z dvoch prístupov prestupu hmoty cez efekt vyparovania, resp. kondenzácie. Pri užívaní viacfázových modelov VOF a Mixture sa pre tento efekt využíva Leeho model. Pri užití Eulerovského modelu je možnosť použiť i model Termálnej zmeny fáze. Eulerovský multifázový model môže byť zvolený aj v prípade práce s modelom medzifázového súčiniteľa priestupu tepla. V Leeho modeli sa prestup hmoty, teda vyparovanie alebo kondenzácia, riadi rovnicou prenosu pár, resp. plynnej fáze (2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (2)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú tieto veličiny  $q_{\text{jednofáz}}$

- $v$  parná fáza [-]
- $\alpha_v$  objemový zlomok parnej fáze [-]
- $\rho_v$  hustota pár [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\vec{V}_v$  rýchlosť parnej fáze [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\dot{m}_{lv}, \dot{m}_{vl}$  hodnota prestupu hmoty z dôvodu vyparovania, respektíve kondenzácie [ $\text{kg/s/m}^3$ ]

V programe ANSYS Fluent sa Leeho model používa často na popis fázovej premeny ako v blízkosti steny, tak i v jadre toku. Deje v blízkosti steny sú ešte rozšírené o empirické vzťahy.



Obr. 4 - Diagram varu [7]

### 3.3.2 Model stenového varu

Termín *podchladený var* (z angl. „subcooled boiling“) označuje fyzikálny jav, kedy je teplota steny kanála natoľko vysoká, že umožňuje vznik varu na stene, zatiaľ čo priemerná teplota v jadre objemu kvapaliny je pod saturačnou teplotou. V takýchto prípadoch je energia prenášaná priamo zo steny do kvapaliny. Časť z tejto energie spôsobí zvýšenie teploty kvapaliny, zvyšok sa podieľa na vzniku pary. Medzifázová výmena tepla taktiež zapríčini zvýšenie priemernej teploty kvapaliny. Určité množstvo energie môže byť prenesené zo steny priamo do plynnej fázy. Tieto mechanizmy sú základom pre Rensselaer Polytechnic Institute model, tzv. RPI model. V ANSYS Fluent sú modely stenového varu dostupné v kontexte Eulerovského viacfázového modelu. Viacfázové prúdenie sa riadi rovnicami zachovania continuity, hybnosti a energie. Modely stenového varu sú kompatibilné s tromi okrajovými podmienkami steny – izotermická stena, špecifikovaný tepelný tok a špecifikovaný súčiniteľ prestupu tepla.

### 3.4 Štúdie zamerané na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu

Ako je už uvedené vyššie v tejto práci, dvojfázové prúdenie či jeho modelovanie sú oblasti dodnes veľmi málo popísané. S dostupnosťou výpočtovej techniky a narastajúcimi kapacitami pamäte však pribúda mnoho štúdií a vedeckých prác zameraných na lepší popis týchto dejov pri rôznych podmienkach.

Tab. 1 - Súhrn prác zameriavajúcich sa na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu

<i>Práca</i>	<i>Autori</i>	<i>Použitý dvojfáz. model</i>	<i>Model varu</i>	<i>Počet buniek výpočtovej siete</i>
[3]	Peng J. a spol.	Euler	RPI	2,53 mil.
[9]	Saleem A. a spol.	VOF	Lee	71 693
[10]	Pothukuchi H. a spol.	Euler	RPI+WHFP	12 000
[11]	Wang X. a spol.	VOF	Lee	41 468
[12]	Soleimani A. a spol.	VOF	Lee	68 600
[13]	Zhang R. a spol.	Euler	RPI	niekoľko sietí

Peng J. a spol. sa vo svojej práci [3] zameriavajú na simuláciu rozloženia bublín pri podchladenom prietokovom varení v trubke s kruhovým prierezom o vnútornom priemere 24 mm a dĺžke 1000 mm v statickej polohe i pri rotačnom pohybe. Experiment bol vykonaný dodržiavajúc okrajové podmienky podľa Tab. 2.

Tab. 2 - Okrajové podmienky použité v štúdiu [3]

<i>Vtok</i>	<i>Výtok</i>	<i>Prestup tepla stenou</i>	<i>Počet buniek siete</i>
Vtok s predpísanou rýchlosťou	Výtok s predpísaným tlakom	konšt. tepelný tok	2,53 mil. buniek

Pre zabezpečenie kvalitných výsledkov bol vykonaný test nezávislosti siete, kedy boli vytvorené siete s rôznou jemnosťou, konkrétne 760 tisíc; 2,53 milióna a 4,22 milióna buniek. Stredná teplota pri použití prvej siete bola o 2 stupne vyššia než u ostatných, výsledky druhej a tretej jemnosti siete sa líšili o 1 K (približne 0,25 %), čo bol pre účely experimentu zanedbateľný výsledok. Keďže sa jedná o zložený pohyb (prúdenie kvapaliny smerom nahor a zároveň rotácia trubky), v momentovej rovnici bolo potrebné uvažovať Coriolisovo zrýchlenie. V situácii, ktorou sa zaoberá táto diplomová práca, toto nie je potrebné, keďže doména je v pokoji relatívne k prúdeniu.

Použitým riešičom bol ANSYS Fluent, konkrétne Eulerovský model pre dvojfázový var, ktorý uvažuje kvapalinu ako súvislú entitu a plyn (výpary) ako dispergovanú zložku. Pre simulovanie rotácie bol vytvorený kód ako „*user-defined-function*“ a vložený do nástroja Fluentu. Pre efekt varu na stene bol použitý RPI model varu. Fyzikálne vlastnosti súvislej fáze, teda vody, boli definované vstupnou teplotou a tlakom systému, pričom fyzikálne vlastnosti pary korešpondovali vlastnostiam sýtej pary pri uvažovanom tlaku. Za zmienku stojí uvažovaný tepelný tok v rozmedzí 380 až 400 kW/m<sup>2</sup>, keďže termálna okrajová podmienka a jej správne zadanie bude dôležité pre túto prácu.

Z výsledkov popisovanej štúdie orientovanej na rozloženie parnej frakcie v kruhovej trubke potom vyplýva, že objemový zlomok plynnej fáze je veľmi malý uprostred kruhového prierezu trubky a narastá smerom ku stene pri statickej analýze. Pri uvažovaní rotácie sa výsledky značne líšia a periodicky sa menia v čase v závislosti na rotačnom pohybe a jeho perióde.

V inej práci [9] venovanej prehrievaniu steny pri počiatku bublinkového varu autori Saleem A. a spol. vykonali rozsiahlu rešerš prác. Konštatujú, že obecná metóda na predpovedanie kritického prehrievania steny pre široký rozsah kvapalných médií pri uvažovaní rôznych geometrií a pri rôznych charakteristikách prúdenia v súčasnosti neexistuje, alternatívou však môže byť CFD prístup. Pre overenie tohto tvrdenia bol vytvorený 3D výpočtový model v programe ANSYS Fluent v18.2. Táto práca rieši dvojfázové prúdenie použitím modelu VOF (Volume of fluid).

Ako geometria bola opäť zvolená trubka kruhového prierezu umiestnená horizontálne s priemerom 23,8 mm a dĺžkou 207,2 mm. Kvalita siete sa na rozdiel od starších štúdií nepohybuje v zadanom rozmedzí, ale pomocou ICEM CFD bola vytvorená sieť s premenlivou hustotou buniek typu štvorsten a šesťsten. Tento prístup umožnil vytvorenie buniek s minimálnou veľkosťou iba 0,8 mm pri stene, čo umožní presnejší popis vytvárania bublín v tejto oblasti, pričom veľkosť buniek narastá so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od steny. Celkovo bolo vytvorených 71 693 buniek. Bohužiaľ, okrajové podmienky modelu práca bližšie nepopisuje. Venuje sa však dôkladne tvorbe bublín v závislosti na teplote steny, resp. tepelnom toku stenou a prispieva tak k lepšiemu poznaniu tejto problematiky, čo bude pre účely tejto práce dôležité, nakoľko riešená geometria je tvorená trubkovým zväzkom s veľkou teplovýmennou plochou.

Model VOF, ako štúdia uvádza, je najviac rozšírený výpočtový model pre sledovanie rozhrania kvapalina-plyn. Riešením rovnice kontinuity pre každú fázu sleduje rozhranie vo výpočtovej bunke (kontrolovaný objem). Kompenzáciu fázovej premeny, teda varu kvapaliny a vytváranie bublín, zabezpečuje použitie *Leeho* modelu. Prestup hmoty prebiehajúci pri fázovej premene je ovplyvnený faktorom intenzity prestupu hmoty označeným ako *coeff*. Tento parameter, ako zdroj uvádza, je potrebné vyladiť v takej miere, aby teplota rozhrania voda-bublina bola podobná saturačnej teplote. Použitý model turbulencie  $k-\varepsilon$  je pomerne robustný a stabilný aj v širokom rozsahu nastavenia prúdenia. Práca sa sústreďí jednak na dej prirodzenej konvekcie v kvapaline v kľude, ako aj na nútenú konvekciu pri prúdení. Pre túto diplomovú prácu je relevantný práve druhý jav.

Fázová zmena umožňuje značné zvýšenie schopnosti extrakcie tepla z teplovýmennej plochy, čo má za následok významné zníženie koeficientu prestupu tepla v parnej fáze. To vedie k náhlemu zvýšeniu teploty steny teplovýmennej plochy. Pothukuchi H. a spol. sa vo svojej práci [10] sústreďujú práve na predikciu tohto javu, v odbornej literatúre nazývaného *kritický tepelný tok*. Je významný pre návrh a bezpečnosť mnohých priemyselných aplikácií, ktoré zahŕňajú fázovú premenu. Vyskytuje sa v prípadoch nízkej i vysokej kvality pár v závislosti na prevádzkových podmienkach. Kritický tepelný tok s nízkou kvalitou sa označuje aj ako odklon od bublinkového varu a vyskytuje sa v bublinkovom toku pri malom hmotnostnom prietoku ako dôsledok hromadenia bubliniek pary na stene. Pri veľkom hmotnostnom prietoku sa vďaka vysokej rýchlosti chladiwa bublinky nedokážu akumulovať v tejto oblasti a vytvárajú parnú oblasť v jadre toku, čím obmedzujú prúdenie kvapaliny len na oblasť okolo steny, kde vytvára tenkú kvapalnú vrstvu. Tá postupne ale mizne a dochádza k vyschnutiu, ktoré je charakteristické pre tento jav. Kritický tepelný tok teda vyjadruje maximálny tepelný tok, pri ktorom skokovo narastá teplota teplovýmennej plochy a dochádza k jej zlyhaniu alebo roztaveniu. Na rozdiel od jednofázového prúdenia musia byť rovnice výmeny hmoty, hybnosti a energie na medzifázovom rozhraní medzi kvapalinou a plynom dôkladne vyhodnotené a započítané, aby bolo možné s relevantnou presnosťou predpovedať vyschnutie v komplexnom dvojfázovom toku. Spoľahlivosť a robustnosť výpočtového modelu varu sú vo veľkej miere závislé na schopnosti určiť tieto medzifázové vlastnosti presne.

Pre simuláciu takéhoto zaťaženia sa typicky využíva *Euler* multifázový model v spolupráci s „*wall heat flux partition*“ (*WHFP*), ktorý ale nepracuje s konvektívnym prestupom tepla parnej fáze. Ilev a spol. [14] preto rozšírili tento model o konvekciu parnej fáze a toto rozšírenie bolo neskôr zaradené ako súčasť ANSYS Fluent. Na základe toho možno predpovedať zmenu teploty steny a identifikovať miesto kritického tepelného toku. Vyschnutie sa zvyčajne vyskytuje pri prstencovom režime prúdenia, kde pary tvoria súvislú fázu a kvapalina vytvára tenkú vrstvu pozdĺž steny a je dispergovaná ako kvapôčky v parnom jadre. WFHP model je teda zovšeobecnený pre simulovanie všetkých režimov prúdenia započítaním konvektívneho prestupu tepla zo steny do parnej fáze. V takomto modeli je potom tepelný tok ( $q_w$ ) rozdelený do 4 komponentov. Sú nimi konvektívny prestup tepla do kvapalnej fáze ( $q_{conv,l}$ ), kaliaci tepelný tok ( $q_{quen}$ ), výparný tepelný tok ( $q_{evap}$ ) a konvektívny prestup tepla do plynnej fáze ( $q_{conv,g}$ ).

Keď kvapalina vstupuje do priestoru výmeny tepla, odoberá teplo z povrchu teplovýmennej plochy a prechádza viacerými zmenami režimu prúdenia vyskytujúcimi sa pri prietokovom varení. Najskôr sú bublinky pary rozptýlené v súvislej kvapalnej fáze pri bublinkovom režime prúdenia. Bublinky následne začnú formovať zhluky parnej fáze a vytláčajú kvapaliny smerom k stene pri nedokonalom prstencovom režime. Ďalšou výmenou tepla sa z parnej fáze stáva fáza súvislá, v ktorej sú rozptýlené kvapôčky vody. Jednotlivé fáze si tak vymenia postavenie v doméne.

Pre optimálnu kvalitu siete bola vykonaná štúdia senzitivity, podľa ktorej bola zvolená sieť s označením Mesh3 ako konečná sieť, keďže ďalšie zjemňovanie nemalo vplyv na teplotu steny. Skúmané siete sú popísané v Tab. 3 a použité okrajové podmienky sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 3 - Skúmané siete v štúdii [10]

Názov siete	Počet buniek
Mesh1	3000
Mesh2	6000
Mesh3	12000
Mesh4	48000

Tab. 4 - Okrajové podmienky v štúdii [10]

Vtok	Výtok	Stenová podmienka
Vtok s predpísanou rýchlosťou	Výtok s predpísaným tlakom	Statická stena – bez sklzu Konšt. Tepelný tok

Táto štúdia využila Euler-Euler prístup viacfázového prúdenia pre lokalizáciu vyschnutia spôsobeného kritickým tepelným tokom a variáciu teploty steny pre niekoľko geometrických usporiadaní. Ukázalo sa, že súčasný rámec poznania dokáže predpovedať tento jav pomerne presne (odchýlka bola cca 7 – 15 % v závislosti na geometrii) a to pre jednoduchú, ale aj komplexnejšiu geometriu. Ďalej sa ukázalo, že model turbulencie  $k-\varepsilon$  dokázal predpovedať maximum teploty steny presnejšie v porovnaní s inými modelmi.

Napriek tomu, že CFD v poslednej dekáde prešlo značným vývojom a zdokonalením čo sa týka jednofázového prúdenia, oblasť viacfázového prúdenia, a predovšetkým so zmenou fáze, zostáva aj naďalej výzvou z hľadiska presnosti a výpočtovej náročnosti. Dôvodom je komplexnosť vyjadrenia medzifázových rozhraní, ako vo svojej práci [11] konštatujú Wang X. a spol. Autori pokračujú popisom modelov zmeny fáze v CFD simuláciách, vrátane Leeho modelu. Práve tento je dnes najrozšírenejší v širokom rozsahu aplikácií, predovšetkým takých, kde dochádza ako k vyparovaniu, tak ku kondenzácii. Konkrétne sa táto štúdia zaoberá termosyfónmi a je pomerne rozsiahla.

Doména pozostáva z 2D geometrie a fluidného regiónu so solidom. Sieť bola zvolená na základe testu nezávislosti siete, kedy bolo vytvorených 5 sietí s počtom buniek od 12 548 až po 63 029. Test preukázal, že rozdiel vo výsledkoch je zanedbateľný pri veľkosti siete 40 000 buniek, a teda bola zvolená štvrtá sieť s počtom buniek 41 468. Použitá okrajová podmienka pre prestup tepla bola konvekcia, kde boli zadané hodnoty teploty voľného prúdu a súčiniteľu prestupu tepla získané experimentálne. Ako výpočtový model bol zvolený VOF prístup s uvažovaním konštantnej saturačnej teploty a konštantného tlaku a hustoty, ďalej šmykové napätie na medzifázovom rozhraní bolo zanedbané a je uvažovaný laminárny tok. Bola použitá SIMPLE schéma pre spojenie tlak-rýchlosť a pre diskretizáciu rovníc hybnosti a energie bola použitá schéma druhého rádu. Časový krok bol špecifikovaný ako  $10^{-4}$  s.

Jednou z príčin štúdia prietokového varu je lepšie popísať režimy prúdenia a ich dopad na mechanizmy prestupu tepla, uvádzajú Soleimani A. a spol. vo svojej štúdii [12], ktorá sa zameriava na prietokový var v mikrokanáloch. V rešerši vychádzajú z doposiaľ vykonaných experimentov a prác v tejto oblasti, no čerpajú informácie i z bežných aplikácií, kde je prítomný prietokový var. Rešerš sa v pomerne vysokej miere odkazuje na štúdie, kde bol pre modelovanie prietokového varu použitý VOF viacfázový model. Rovnaký prístup zvolili aj autori tejto štúdie. VOF viacfázový model rieši jeden súbor transportných rovníc. Každý výpočtovej bunke prislúcha aspoň jedna fáza a pokiaľ sa v nej objavia dve fázy, bunka reprezentuje fázové rozhranie.

Geometriu tvorí kanál chladiča obdĺžnikového tvaru o výške 304,9  $\mu\text{m}$  a šírke 123,4  $\mu\text{m}$ , celková výška kanála a steny je 404,9  $\mu\text{m}$ . Materiálom je meď s tepelnou vodivosťou 387,6 W/mK. Okrem teploty média na vtoku je termálna okrajová podmienka zadaná na ohrievanú stenu vo forme konštantného tepelného toku o veľkosti 440 W/cm<sup>2</sup>. Ako médium je použitá kvapalina s označením HFE-7100. Dostupnosť dát pre pary tohto média sú v literatúre obmedzené, preto boli použitá lineárna interpolácia dostupných tabuľkových dát pre získanie potrebných hodnôt.

Sieť bola vytvorená z buniek typu šesťsten. Pre lepšie zachytenie teplotných gradientov v okolí steny bola v tejto oblasti použitá jemnejšia sieť. Z vytvorených sietí zobrazených v Tab. 5 bola zvolená sieť s najmenšou výpočtovou náročnosťou a s minimálnou chybou dimenzovania veľkosti bunky – Sieť 3. V dvojfázových tokoch však nie je možné odstrániť chyby spôsobené dimenzovaním buniek z dôvodu jeho účinku na objemový zlomok fáz.

Tab. 5 - Siete použité v štúdii [12]

Názov siete	Počet buniek	Priemerná šikmost' bunky
Sieť 1	25 200	0,37
Sieť 2	43 900	0,30
<u>Sieť 3</u>	<u>68 600</u>	<u>0,25</u>
Sieť 4	114 400	0,22
Sieť 5	181 600	0,20

Pre numerický výpočet bol použitý ANSYS Fluent v18.2. Kvôli prítomnosti varu bol zvolený tranzientný, teda časovo závislý výpočet. Veľkosť časového kroku bola uvažovaná ako premenná, ktorá sa riadila fixne daným Courantovým číslom o hodnote 0,9. Použité diskretizačné schémy sú uvedené v Tab. 6.



Tab. 6 - Diskretizačné schémy VOF modelu použité v štúdiu [12]

Prepojenie tlaku-rýchlosti	PISO
Rovnica hybnosti	QUICK
Rovnica energie	Second-Order Upwind
Tlaková diskretizácia	Body force weighted

Výsledky naznačujú rozrušenie termálnej medznej vrstvy spôsobené pohybom bubliniek parnej fáze v blízkosti stien, čo zvyšuje hodnoty prestupu tepla pri prietokovom varení v porovnaní s jednofázovým prúdením. Súčiniteľ prestupu tepla sa lokálne zvyšuje po nástupe bublinkového varu a taktiež bola pozorovaná výrazná zmena v rozložení teploty steny spôsobená varom a pohybom bublín.

V štúdiu [13] od autorov Zhang R. a spol. bola skúmaný efekt nútenej konvekcie pri podchladenom varení vo vertikálnom kanáli a vplyv modelu turbulencie na vlastnosti toku a prestup tepla. Modely turbulencie založené na Reynoldsovej metóde sú najpoužívanejšími v inžinierskej praxi. Rôzne modely turbulencie sa môžu líšiť výsledkami. V tejto práci boli testované *Standard*, *RNG* a *Realizable*  $k-\varepsilon$  modely a ďalej *SST*  $k-\omega$  model. Jednotlivé modely turbulencie vyžadujú rôzne rozlíšenie v okolí steny kanála, tzv. medznej vrstvy. Pre modely  $k-\varepsilon$  s použitím stenovej funkcie je potrebné, aby sa medzná vrstva nachádzala v plne turbulentnej oblasti. Pri použití vylepšenej stenovej funkcie (z angl. „enhanced wall function“) však dokáže tento model pracovať aj menšími hodnotami  $y^+$ . Pri  $k-\omega$  modeloch je potrebné zaistiť, že sieť v bezprostrednom okolí steny v oblasti viskózne podvrstvy je dostatočne jemná. Hodnota  $y^+$  by sa mala u tohto modelu pohybovať okolo hodnoty 1. Boli vytvorené 4 siete s rôznou charakteristikou. Siete s označením ICM1 a ICM2 sú vhodné pre použitie s  $k-\varepsilon$  modelom, ICM3 a ICM4 s  $k-\omega$ , i keď ICM3 vykazuje i  $y^+$  prechodnej oblasti (z angl. „buffer layer“). Jednotlivé siete a ich charakteristiky sú zobrazené v Tab. 7.

Tab. 7 - Siete vytvorené v štúdiu [13]

Názov siete	Počet buniek	$y^+$ v okolí steny
ICM1	63 481	46,1 – 106,0
ICM2	72 237	12,7 – 35,7
ICM3	85 371	7,4 – 21,8
ICM4	172 931	0,6 – 4,1

V tejto štúdiu bol použitý Eulerovský viacfázový model spolu s RPI modelom varu predstaveným vyššie. V simulácii sa uvažovalo aj s možnosťou medzifázového prestupu tepla z kvapalnej fázy do parnej v oblasti blízko steny a prestup tepla medzi parnou a kvapalnou fázou v podchladenom jadre. Bola použitý *COUPLED* algoritmus a *Least Squares Cell Based* gradientná diskretizácia. Zvyšné rovnice boli diskretizované spočiatku prvým rádom, neskôr schémou QUICK po prvotnej konvergencii

Výsledky použitého  $k-\varepsilon$  modelu na určených sieťach vykazujú lepšiu zhodu s experimentálnymi dátami ako pri použití  $k-\omega$  modelu turbulencie. Vylepšená stenová funkcia si nedokázala poradiť s hodnotami  $y^+$  v okolí 1. Model  $k-\varepsilon$  so správnou jemnosťou siete dokázal veľmi presne popísať podchladený var vo vertikálnom kanáli.



## 4 Parný generátor na prevádzke KD3

Výmenník tepla riešený v tejto práci sa nachádza na prevádzke výroby kyseliny dusičnej v chemickom podniku DUSLO, a.s. Výmenník je súčasťou kotla, v ktorom dochádza k spaľovaniu vzducho-čpavkovej zmesi. Tento proces je bližšie popísaný v nasledujúcej kapitole, ktorá sa odkazuje na zdroj [15].

### 4.1 Príprava vzducho-čpavkovej zmesi

Suroviný vstupujúce do procesu sú atmosférický vzduch a kvapalný čpavok. Podnik má vlastnú výrobu čpavku a na prevádzku KD3 sa privádza z rozvodu vysokotlakého čpavku o tlaku 1,4 MPa. Skrz regulačný ventil následne vstupuje do výparníku čpavku, kde prebieha vyparovanie pri tlaku 820 kPa a teplote 24 °C. Atmosférický vzduch je nasávaný z okolia vzduchovým kompresorom, v ktorom sa následne stlačí na požadovaný tlak 680 kPa.

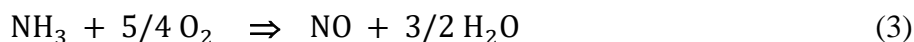
Posledným krokom prípravy je zmiešanie týchto plynov v zmiešavači, kde sa v požadovanom pomere mieša plynný čpavok s primárnym vzduchom. Miešacia účinnosť dosahuje 98 % a normálna hodnota pomeru vzduch : čpavok je rovná 8,524, čomu zodpovedá koncentrácia 10,5 % čpavku v zmesi. Bližší popis je uvedený v bakalárskej práci [16], na ktorú táto diplomová práca nadväzuje.

### 4.2 Spaľovanie a tvorba dusíkatých plynov

Proces výroby kyseliny dusičnej má päť hlavných stupňov [15]:

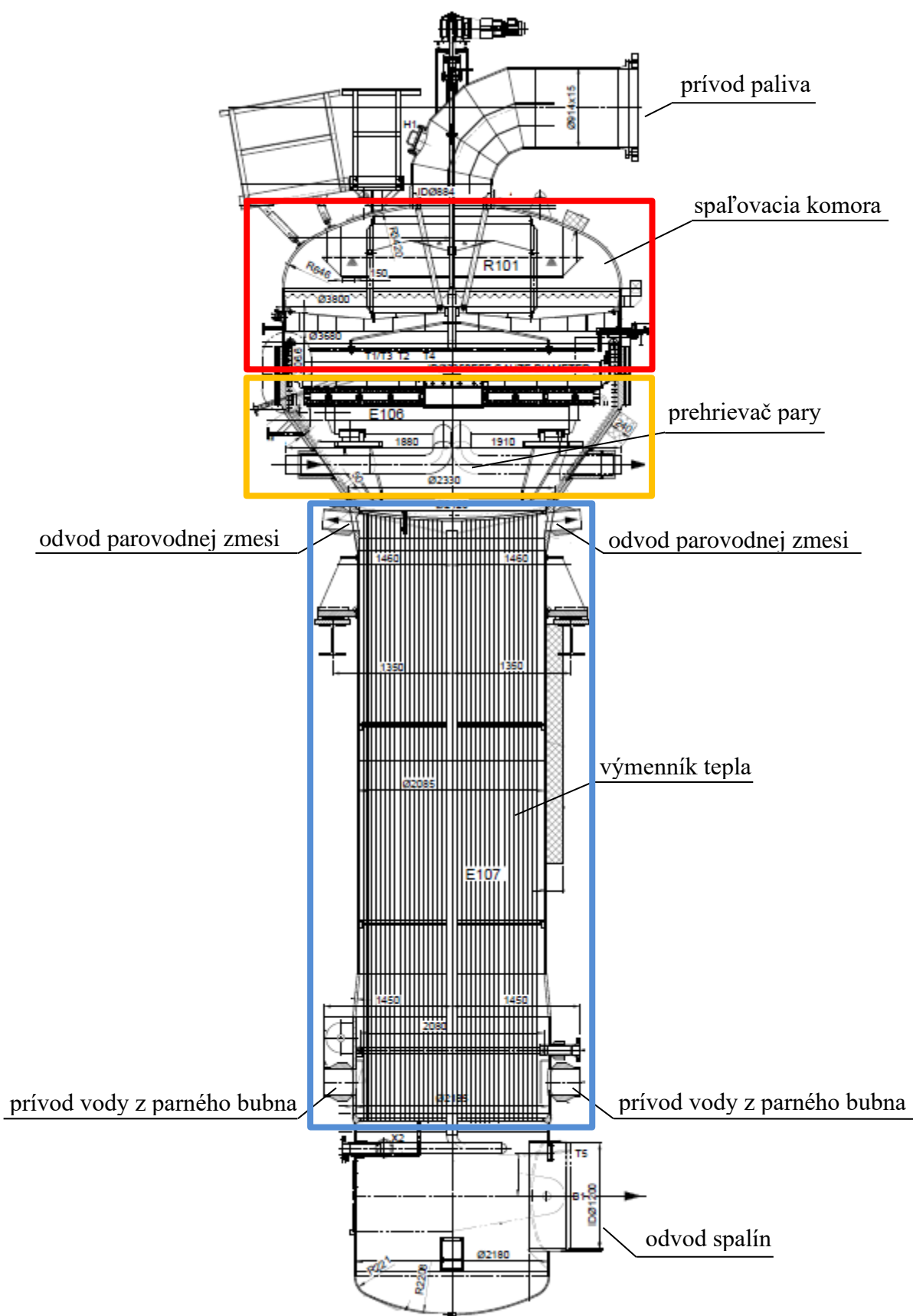
- 1) oxidácia amoniaku  $\text{NH}_3$  vzdušným kyslíkom  $\text{O}_2$  na NO
- 2) oxidácia NO na  $\text{NO}_2$
- 3) absorpcia  $\text{NO}_2$  vo vode za vzniku  $\text{NH}_3$  a NO
- 4) opakovaná oxidácia NO a absorpcia  $\text{NO}_2$  až po hlavu kolóny
- 5) selektívna redukcia  $\text{NO}_x$  plynov

Oxidácia amoniaku prebieha v horáku R101 vyznačenom červenou farbou na Obr. 5 a detailne zobrazenom na Obr. 6. Reakcie prebiehajú na povrchu primárneho katalyzátora, ktorým sú platinovo-ródiové (Pt-Rh) sítá. Primárny katalytický systém pozostáva okrem Pt-Rh sít aj z paládiových (Pd) sít uložených pod nimi. Pd sítá slúžia ako zachytávací systém úletov platiny z vrchných sít. Hlavným produktom reakcií je oxid dusnatý podľa rovnice (3):



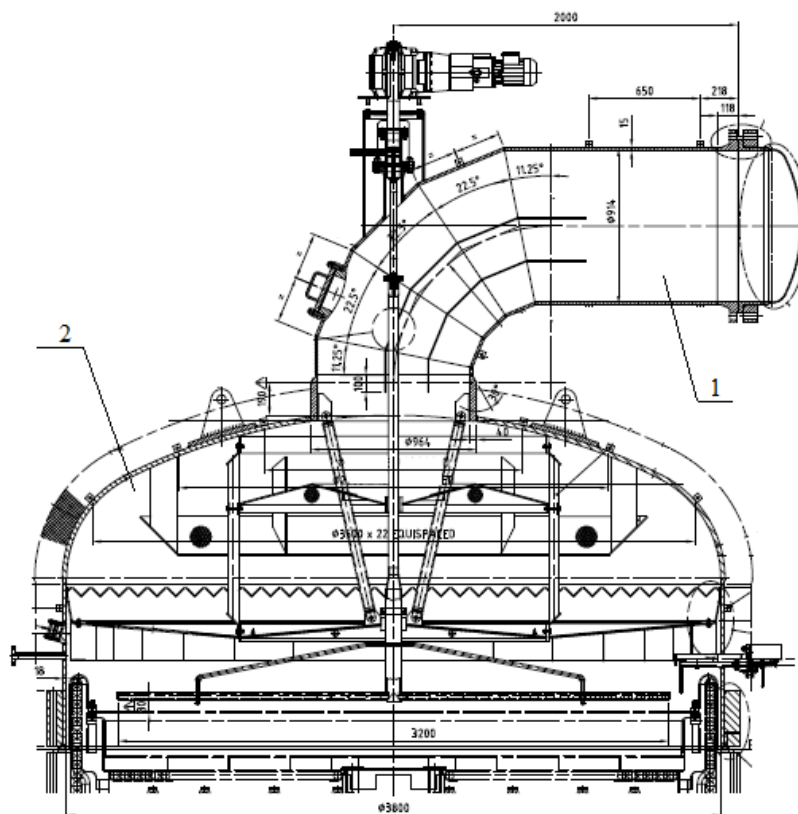
Predpokladá sa, že katalytická reakcia prebieha v troch stupňoch :

- absorpcia  $\text{O}_2$  na katalyzátor,
- vznik imidového radikálu ( $\cdot\text{NH}$ ) na povrchu katalyzátora,
- reakcia  $\text{O}_2$  s imidovým radikálom za vzniku NO a  $\text{H}_2\text{O}$ .



Obr. 5 - Schéma parného generátora na KD3 [17]

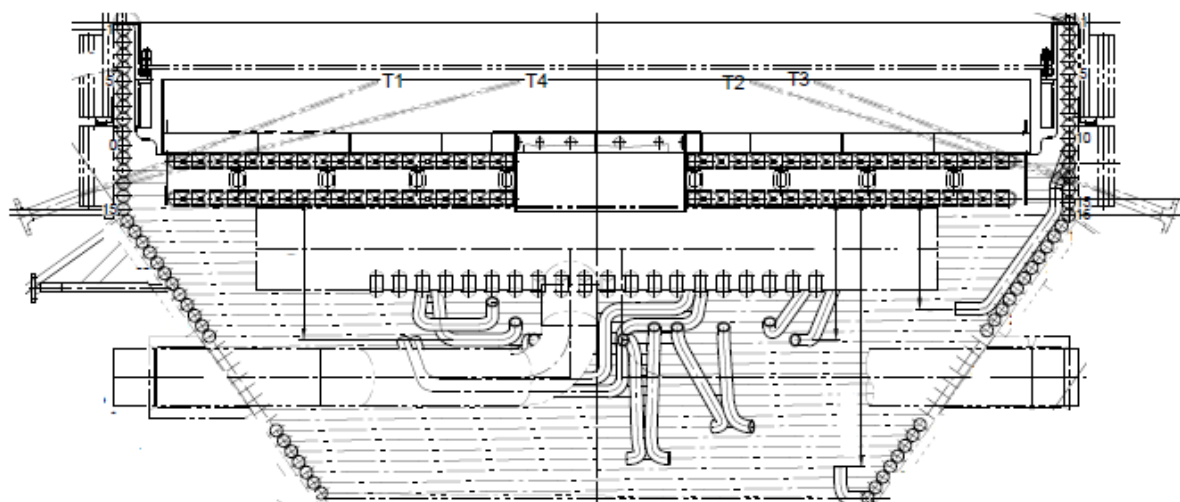
V závislosti na reakčných podmienkach (tlak, teplota, doba styku, aktivita a selektivita katalyzátora) môžu prebiehať na primárnom katalyzátore v rôznej miere i ďalšie reakcie, napríklad oxidácia amoniaku za vzniku oxidu dusného, reakcia amoniaku s oxidom dusnatým či rozklad oxidu dusnatého na dusík a kyslík. Pri danom prietoku plynov cez katalytické sitá sa ich teplota reguluje zmenou pomeru  $\text{NH}_3$ : vzduch tak, aby bol dosiahnutý max. výťažok  $\text{NO}$ , pričom sa používa približné pravidlo, že  $\pm 1\%$   $\text{NH}_3$  spôsobí zmenu teploty o  $\pm 70^\circ\text{C}$ .



Obr. 6 – Horák a spaľovacia komora kotla KD3 [18]

Pod primárnym katalyzátorom je uložený sekundárny katalyzátor Yara, ktorý zabraňuje nežiaducej oxidácii čpavku na  $\text{N}_2\text{O}$ . Použitím sekundárneho katalyzátora klesá produkcia skleníkového plynu  $\text{N}_2\text{O}$ , ktorý sa v danom prostredí správa ako inert, o viac ako 80 %.

Reakcia prebieha pri teplote cca  $920^\circ\text{C}$ ,  $\text{NO}$  je pri tejto teplote termodynamicky nestabilný, preto musí byť reakčná zmes rýchlo ochladená v kotlovom systéme umiestnenom pod primárnym a sekundárnym katalyzátorom. Plynys najskôr prechádzajú prehrievačom pary (vyznačený žltou farbou na Obr. 5 a na Obr. 7), kde odovzdávajú teplo sýtej pare prichádzajúcej z parného bubna. Para vstupuje do prehrievača pri teplote sýtosti  $258,8^\circ\text{C}$  a prehreje sa na teplotu cca  $494,5^\circ\text{C}$ . Časť pary sa používa na pohon parnej turbíny, preto je jej výstupná teplota regulovaná prídavným nástrekom na požadovanú teplotu je  $430^\circ\text{C}$  na turbínu. Zvyšná para odchádza na export do celozávodného parovodu. Následne dusíkaté plyny vstupujú do sekcie parogenerátora.



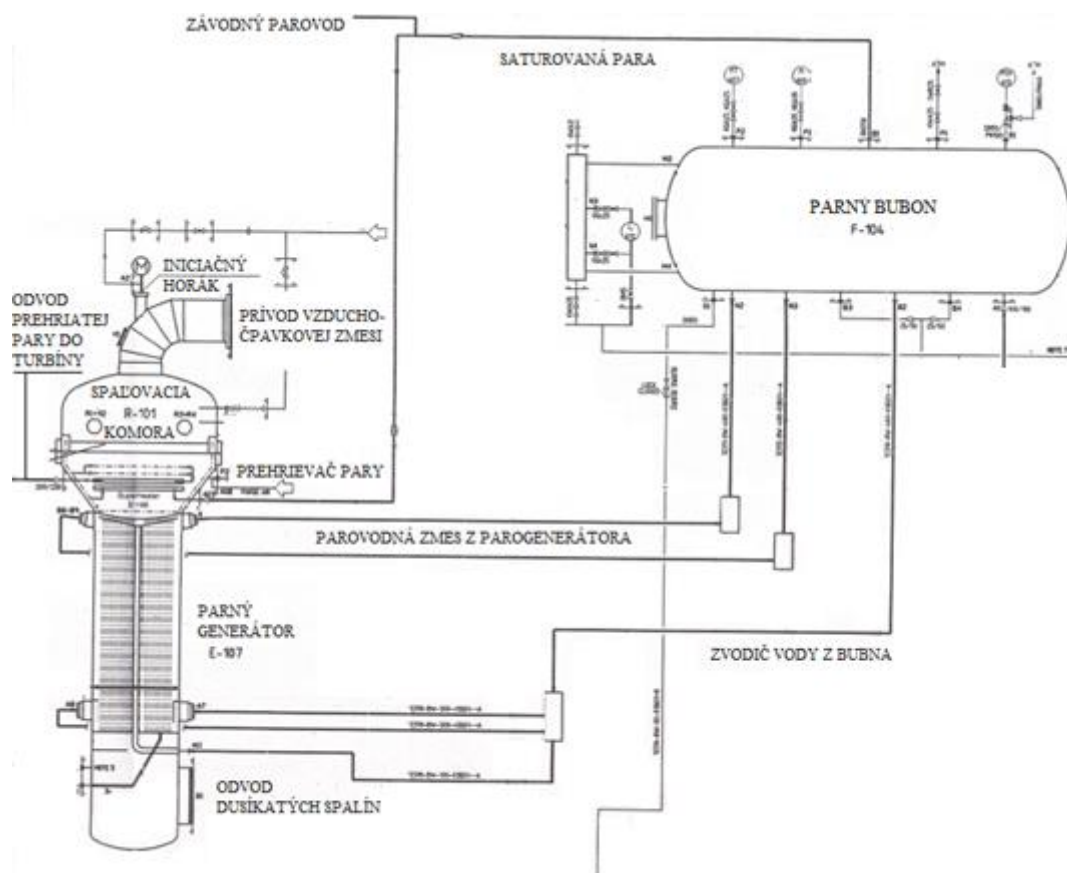
Obr. 7 – Prehrievač pary v kotlovom systéme KD3 [19]

### 4.3 Generátor pary

Najväčšou časťou kotlového celku je protiprúdny výmenník tepla (vyznačený modrou farbou na Obr. 5) slúžiaci na ochladenie dusíkatých plynov po reakcií. Reakčné teplo, ktoré vznikne pri oxidácii amoniaku a s ním spojených reakciách sa týmto spôsobom využije na produkciu pary, ktorá následne poháňa turbínu na prevádzke. Z technologického hľadiska nejde teda len o ochladenie produktu, ale i o efektívne využitie odpadného tepla.

Nitrózne plyny vstupujú do výmenníku vo vrchnej časti pri teplote 804 °C a prúdením vo vnútri trubiek trubkového zväzku odovzdávajú reakčné teplo vode, ktorá je v tomto prípade na plášťovej strane. To, že kotlová voda prúdi v mimotrubkovom priestore a plyny v trubkách, má veľkú výhodu v situácií, keď pri prasknutí jednej trubky nestrieka agresívna para na vedľajšie trubky. Reakčný plyn sa postupne ochladzuje v trubkách vyparovača a výmenníkovú časť opúšťa pri teplote 345 °C. [15, 20]

Kotlová voda cirkuluje v systéme tvorenom kotlom, resp. jeho výmenníkovou časťou a kotlovým telesom, tiež nazývaným parný bubon. Množstvo vody v systéme je regulované jej hladinou v parnom bubne, ktorý má implementované potrubie na odkal nečistôt a zároveň je do neho privádzaná nová kotlová voda z externej nádrže. Celý systém cirkulácie možno vidieť na Obr. 8. Voda prúdi zvodičmi z parného bubna do spodnej časti výmenníku kotla. Ešte pred vstupom sa prúd rozdelí na 3 vetvy – dve vetvy tvoria vtok vody do výmenníkovej časti kotla, tretiu vetvu tvorí samostatné potrubie, ktorým je stredom vyparovača privedený osobitný prúd vody na ochranu vrchnej trubkovnice. Výmenník tepla pracuje na teplote sýtosti pri danom tlaku. Voda vstupuje do výmenníku o teplote tesne pod teplotou sýtosti a vo výmenníku (v tomto prípade vyparovači) dochádza k fázovej premene a tvorbe parnej fázy. Zmes opúšťajúca parný generátor je dvojfázová zmes pary a vody s hmotnostným zlomkom plynnej fázy 0,052 kg/kg podľa bilančných dát [20]. Parovodná zmes sa stupačkami vracia do parného bubna, kde sa pomocou cyklónov oddelí sýta para od vody. Para postupuje do prehrievača pary a voda prúdi zvodičmi späť do parného generátora, čím uzatvára cirkulačný cyklus. [16]



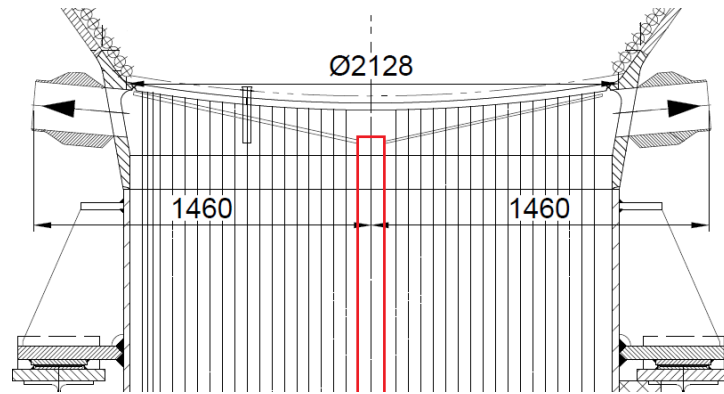
Obr. 8 - Systém cirkulácie kotlovej vody [21]

Z uvedeného popisu vyplýva, že sa jedná o typ „Single Pass“ výmenníku, kedy médium prechádza trúbkami iba jedenkrát a následne opúšťa výmenník. Trubkový zväzok je uložený v dvoch trubkovniciach – jedna je na vrchnej strane a druhá na spodnej. Táto práca sa sústreďuje práve na oblasť vrchnej trubkovnice. [22]

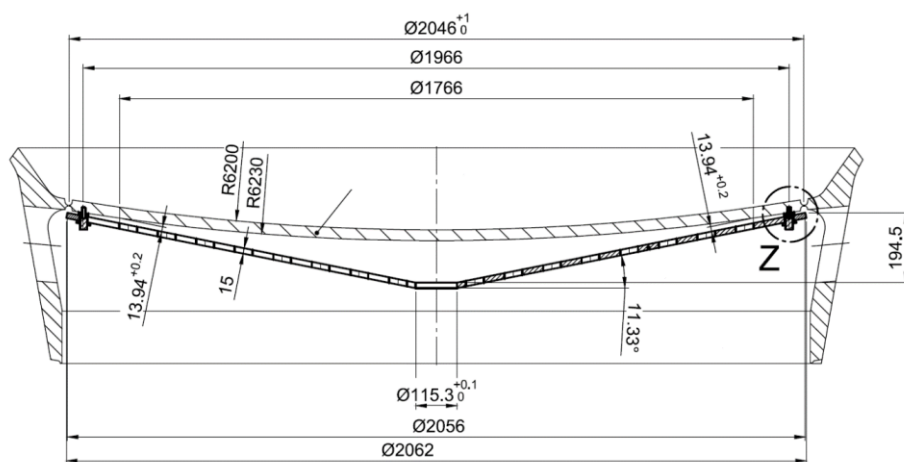
#### 4.4 Vrchná trubkovnica a oblasť outletu

Vrchná trubkovnica kotla na KD3 je vyrobená z materiálu EN 1.7335 a k plášťu nádoby je privarená po celom svojom obvode. Geometria trubkovnice je jemne zahnutá s rádiusom 6 200 mm. Pod trubkovnicou sa nachádza deliaci plech, ktorého stredom prechádza rúra priemeru Ø 114,3x3,6 privádzajúca prúd vody dedikovaný špeciálne na chladenie trubkovnice, keďže táto je najviac exponovaná teplu prichádzajúcich plynov. Usporiadanie týchto komponentov je znázornené na Obr. 9 a detailne na Obr. 10. [23, 24]

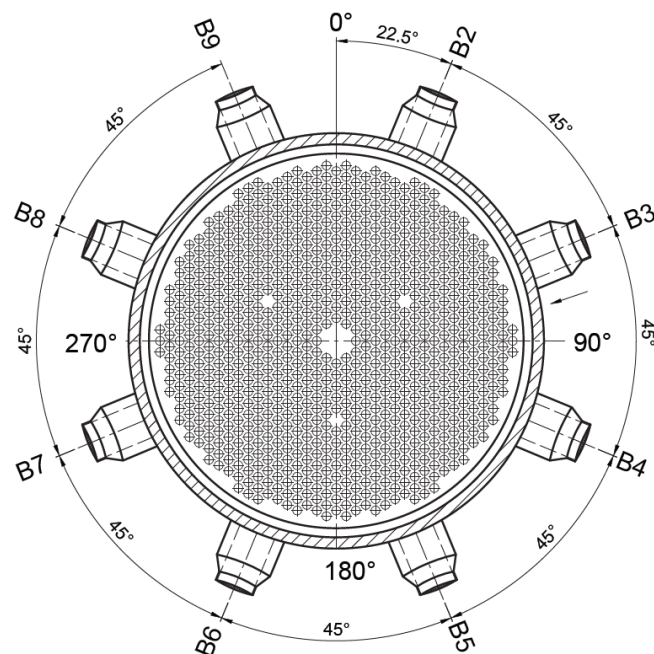
Trubkový zväzok tvorí 879 trúbiek o priemere Ø 48,3x4 mm a dĺžke približne 6,8 m, usporiadaných v rovnomernom rozložení podľa Obr. 11, na ktorom možno vidieť i presné rozloženie hrdiel stúpačiek (z angl. „risers“), ktoré sú od výroby privarené k plášťu nádoby. Na tieto hrdlá sa na mieste prevádzky privaria potrubné vetvy, ktoré odvádzajú vzniknutú parokvapalnú zmes do kotlového telesa.



Obr. 9 – Oblasť vrchnej trubkovnice kotla na KD3 s vyznačeným potrubím prívodu chladiacej vody k trubkovnici [17]



Obr. 10 - Detail vrchnej trubkovnice a deliaceho plechu [25]

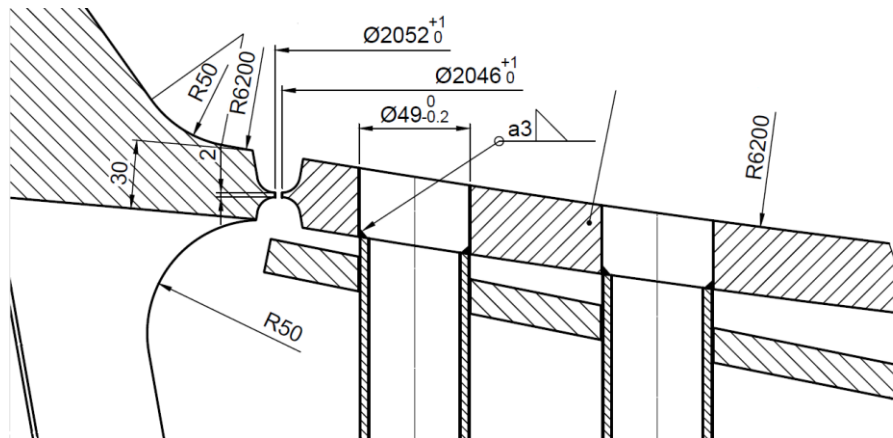


Obr. 11 - Rozloženie trubiek a hrdiel stúpačiek na kotli KD3 [17]



## 4.5 Spojenie trúbiek a trubkovnice

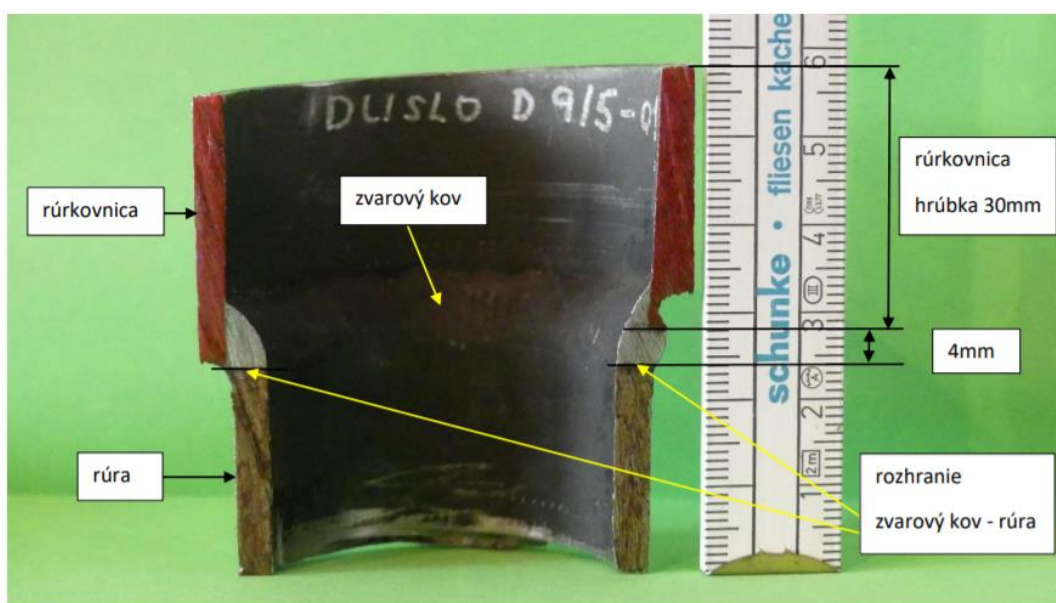
Trubky sú s trubkovnicou spojené kútovým zvarom tak, ako naznačuje Obr. 12. Práve poruchy týchto zvarových spojov spôsobujúce netesnosti v kotlovom systéme a ich možné príčiny boli motívom pre vznik tejto diplomovej práce.



Obr. 12 - Spojenie trúbiek a trubkovnice [24]

### 4.5.1 Chybné prevedenie zvarov

Aj keď sa táto diplomová práca sústreďuje na CFD simuláciu tvorby parnej frakcie v blízkej oblasti trubkovnice, je potrebné na vzniknutý problém hľadiť komplexne, keďže dôvodom poruchy (ako to v praxi často býva) nemusí byť len nadmerné množstvo vznikajúcej pary, ale kombinácia viacerých faktorov. Nezanedbateľným je určite prevedenie zvarových spojov trúbiek a trubkovnice. Výkresom predpísané uloženie týchto komponentov naznačuje Obr. 12. Ako je uvedené v predchádzajúcich častiach práce, trubkovnica nie je rovinná, ale s rádiusom, čo znamená, že pri použití normalizovanej trubky s rovným koncom je potrebné trubku vsunúť do trubkovnice takým spôsobom, aby na vonkajšej strane nevznikla medzera medzi trúbkou a trubkovnicou. Takýto postup však nebol použitý pri výrobe kotla, čo názorne ilustruje Obr. 13.

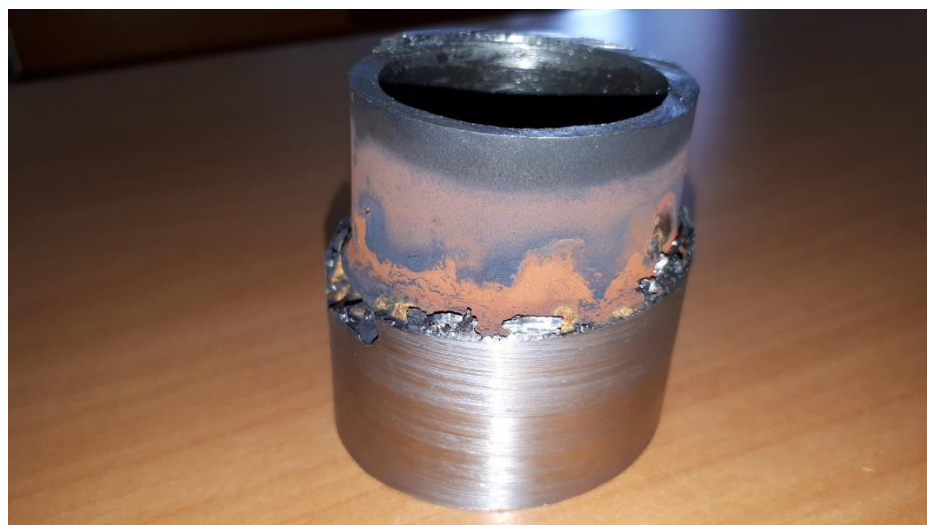


Obr. 13 - Rez spoja trubky a trubkovnice [26]

Z rezu je zrejmé, že trubka bola k trubkovnici uložená kontaktne iba v nižšej časti, čím vznikla na opačnej strane diery trubkovnice vôľa medzi trubkou a trubkovnicou. Táto medzera bola následne vyplnená zvarom. Tým vzniká slabé miesto náchylné na prehrievanie a vznik netesnosti, keďže nitrózne plyny od vody neoddeľuje predpísaná oceľová trubka, ale samotný zvar. Na Obr. 14 a Obr. 15 možno vidieť takto vypracované zvary z vonkajšej strany po 3 rokoch prevádzky zariadenia.



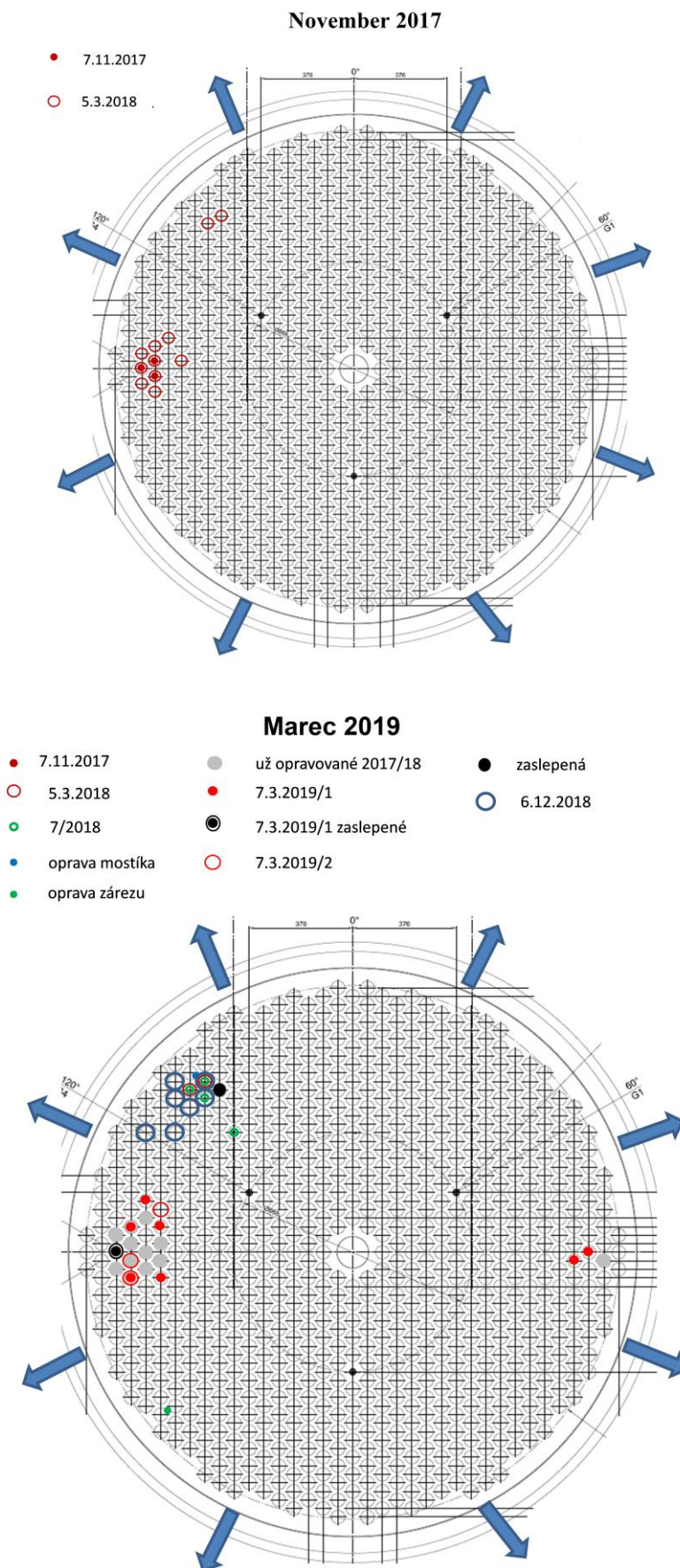
*Obr. 14 - Zvar trubky a trubkovnice (pohľad 1) [26]*



*Obr. 15 - Zvar trubky a trubkovnice (pohľad 2) [26]*

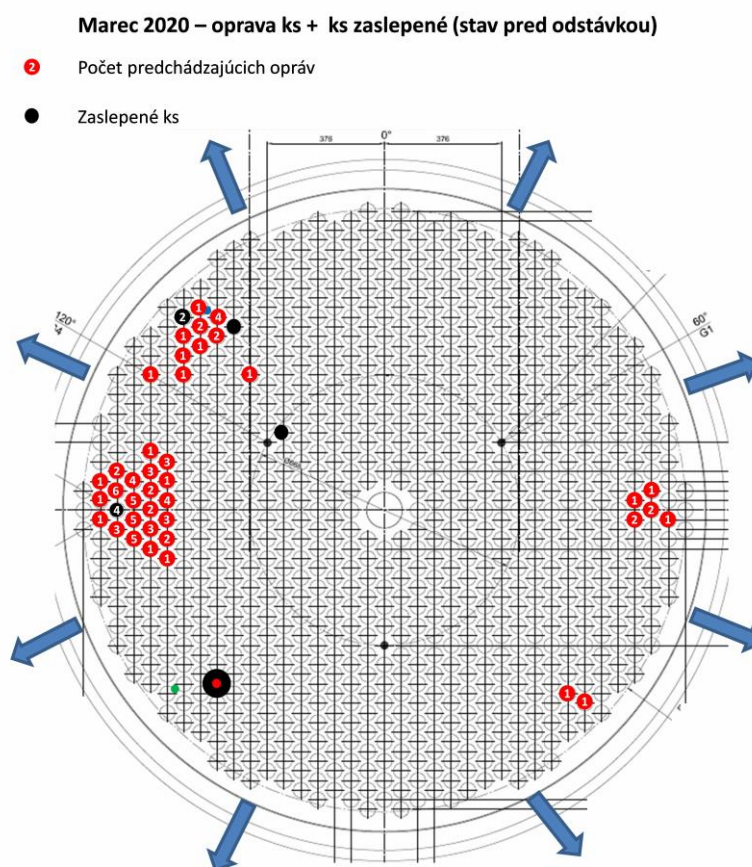
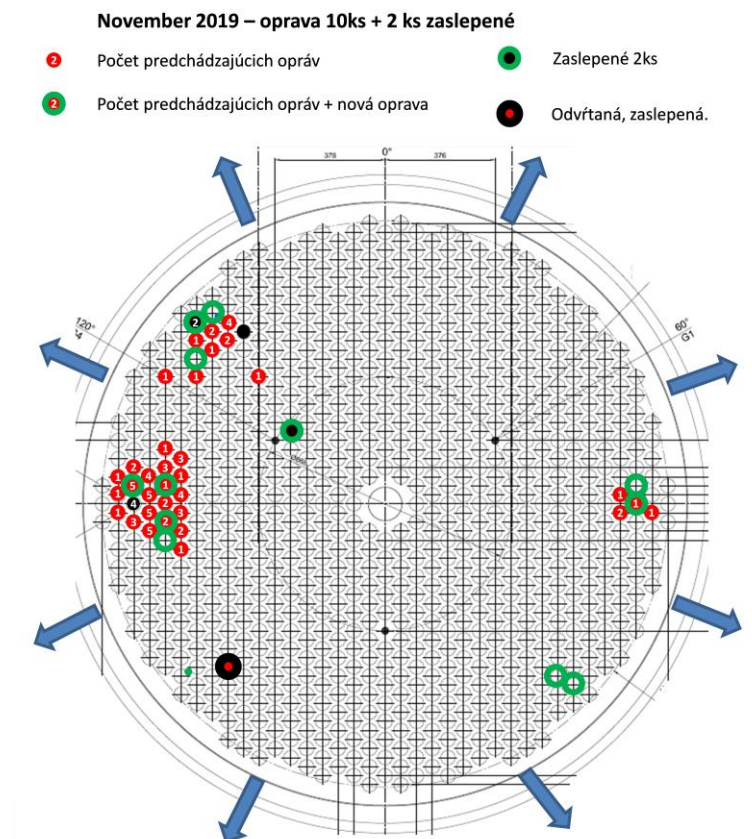
#### 4.5.2 Schéma poškodených trubiek

Ako je uvedené v podkapitole 4.3, kvôli ochrane vrchnej trubkovnice je prostriedkom aparátu privádzaná chladiaca voda do oblasti ohraničenej trubkovnicou a deliacim plechom. Po obvode aparátu sa ďalej nachádza 8 outletov. Zo schém na Obr. 16 **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** a Obr. 17 možno pozorovať trend, kedy dochádza k postupnému porušovaniu zvarov na tých trubkách, ktoré sa nachádzajú v oblastiach medzi outletmi. Vyznačené miesta tak budú pozorované pri spracovávaní výsledkov z numerickej analýzy.



Obr. 16 - Schéma poškodenia trubiek v čase (1) [26]





Obr. 17 - Schéma poškodenia trubiek v čase (2) [26]

## 5 Výpočtový model

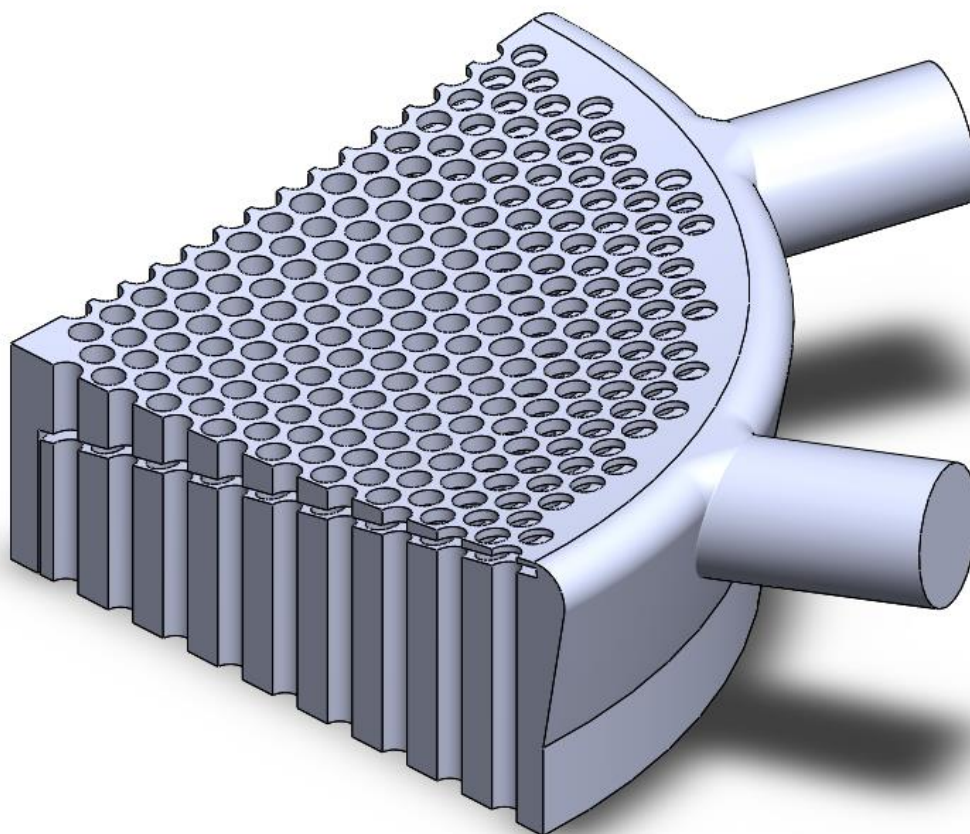
Výpočtový model sa skladá z modelu geometrie, modelu materiálu, výpočtovej siete, modelu zaťaženia a okrajových podmienok a konečno-objemového numerického modelu fyziky [27]. Jednotlivé časti budú predstavené v nasledujúcich kapitolách.

### 5.1 Model Geometrie

Prvým krokom praktickej časti práce a samotnej simulácie je úvaha, ako by mal vyzerat' 3D model geometrie riešeného zariadenia. Pri ďalšom posudzovaní riešenia treba mať na pamäti veľkosť samotného kotla, ktorého priemer prekračuje 2 metre a výška výmenníkovej časti prevyšuje 6 metrov [17]. Je teda pravdepodobné, že bude treba hľadať kompromis medzi veľkosťou modelu, počtom buniek a kvalitou výpočtovej siete a potom medzi presnosťou samotných výsledkov. S ohľadom na tieto skutočnosti je potrebné pristúpiť k niekoľkým zjednodušeniam.

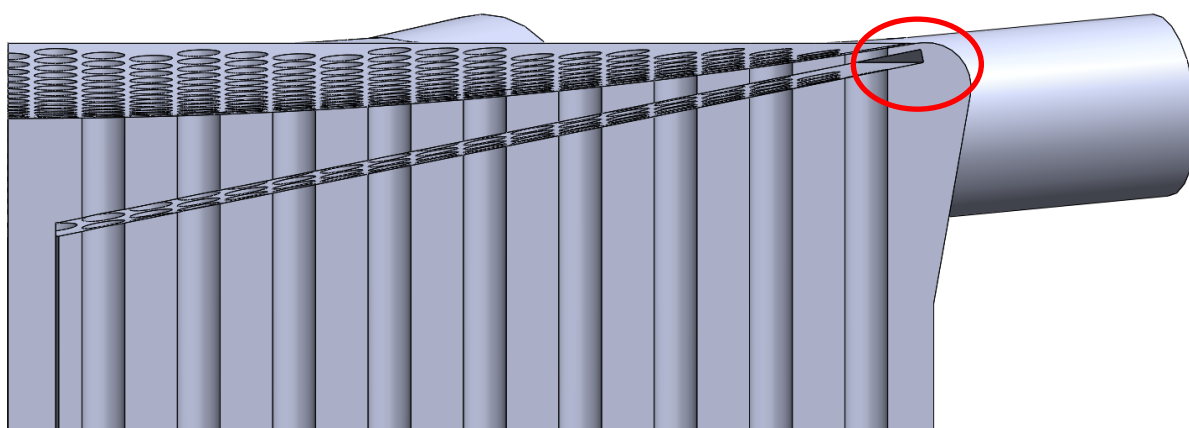
#### 5.1.1 Tvorba 3D modelu v programe SOLIDWORKS

Pre vytvorenie prvotného 3D modelu riešenej časti aparátu bol použitý modelovací program SOLIDWORKS 2019 [28], nakoľko je daná geometria pomerne komplexná. Na Obr. 11 je vhodne znázornený pohľad na výmenník zhora, ktorý ponúka hneď prvé zjednodušenie veľmi často používané v simuláciách, a tým je využitie symetrie. Výmenník tepla možno rozdeliť podľa dvoch na seba kolmých osí symetrie znázornených aj na Obr. 11, ktoré kruhový prierez aparátu delia na štvrtiny, pričom každej štvrtine prislúchajú práve dva výtoky.



Obr. 18 - Izometrický pohľad 3D modelu v programe SOLIDWORKS

O niečo problematickejšie je zjednodušenie týkajúce sa výšky domény. Z kapitoly 4.5 vyplýva, že oblasť najväčšieho záujmu bude oblasť domény ohraničená trubkovnicou a deliacim plechom, kde je samostatným potrubím privádzaná chladiaca voda. Pred opustením výmenníku sa vzniknutá paro-kvapalná zmes zmieša s mokrou parou tvorenou pod deliacim plechom v medzitrubkovom priestore samotného výmenníku. K stretu oboch prúdov dochádza po obvode trubkovnice v mieste najväčšieho zúženia prierezu, čo vystihuje znázornenie Obr. 19, prípadne na Obr. 12. V tomto mieste môže dochádzať k spätnému toku, ktorého následky môžu mať veľký vplyv na reálny popis dejov v tejto oblasti. Ideálne by bolo možné namodelovať celú dĺžku trubiek výmenníku a simulovať túto oblasť. Takéto riešenie by však extrémne navýšilo počet buniek, nároky na pamäť a výpočtový čas. Ako je uvedené v predchádzajúcom odstavci, je potrebné hľadať kompromis medzi veľkosťou modelu a jemnosťou siete. Namodelovaná výška trubiek pod deliacim plechom by mala byť dostatočná na ustálenie prúdenia v tejto oblasti. Bolo otestovaných niekoľko variánt, po konzultáciách a testovacích výpočtoch sa ako vhodnou ukázala byť doména o výške 350 mm v stredovej ose, pri modeloch s menšou hodnotou sa prúdenie pri testovacích steady-state výpočtoch nejavilo dostatočne vyvinuté. Navyše umožnené zjemnenie siete sa neukázalo byť signifikantné.

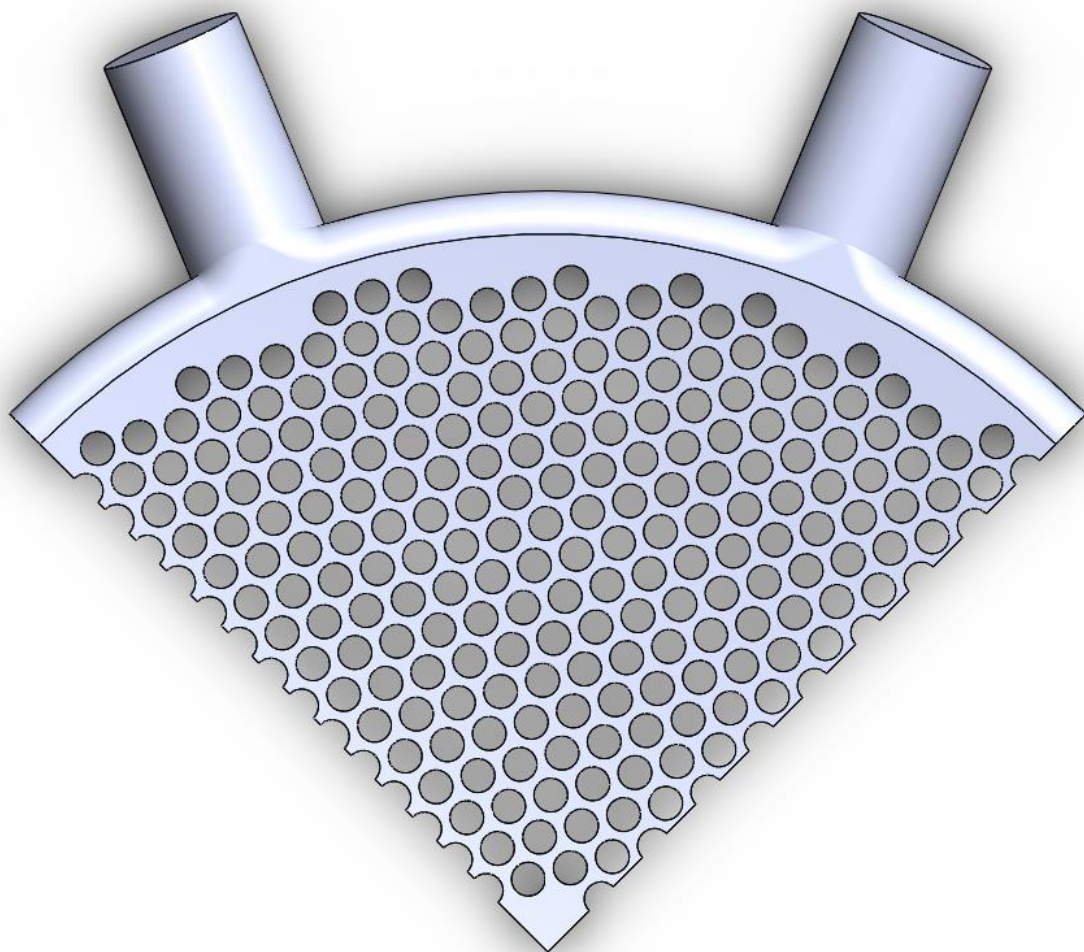


*Obr. 19 - Predný pohľad 3D modelu v programe SOLIDWORKS s vyznačením zúženého miesta stretu prúdov*

V mnohých ohľadoch namodelovaná geometria kopíruje stav predpísaný výkresovou dokumentáciou. Jedná sa predovšetkým o rádius trubkovnice, ktorá nie je rovinná, ale prehnutá s rádiusom 6 200 mm. Ďalej je bez zjednodušenia zachovaný rozmer a uhol deliaceho plechu, ktorý v modeli objemu vytvára dutinu (Obr. 18 a Obr. 19).

Pri použití okrajových podmienok symetrie prislúchajú doméne o rozmere štvrtiny pôvodnej geometrie dva výtoky (názorne na Obr. 20). Obr. 11 ukazuje, že rozmiestnenie výtokov po obvode aparátu je rovnomerné s uhlovým rozdielom  $45^\circ$  medzi susednými výstupmi. Výkresová dokumentácia kotla znázorňuje výstupy ako vystužené hrdlá so zúženým koncom. Na tieto hrdlá sa pri inštalácii kotla na mieste prevádzky privaria potrubné vetvy smerujúce do kotlového telesa. Oblasť outletu je pre simuláciu a jej výsledky taktiež veľmi dôležitá a je účelné namodelovať ju vo vhodnej dĺžke, preto bola hodnota z výkresu braná ako orientačná. Skutočná namodelovaná dĺžka výstupu bola 300 mm.





Obr. 20 - Pohľad zhora na 3D model v programe SOLIDWORKS

### 5.1.2 Úprava 3D modelu v programe SpaceClaim

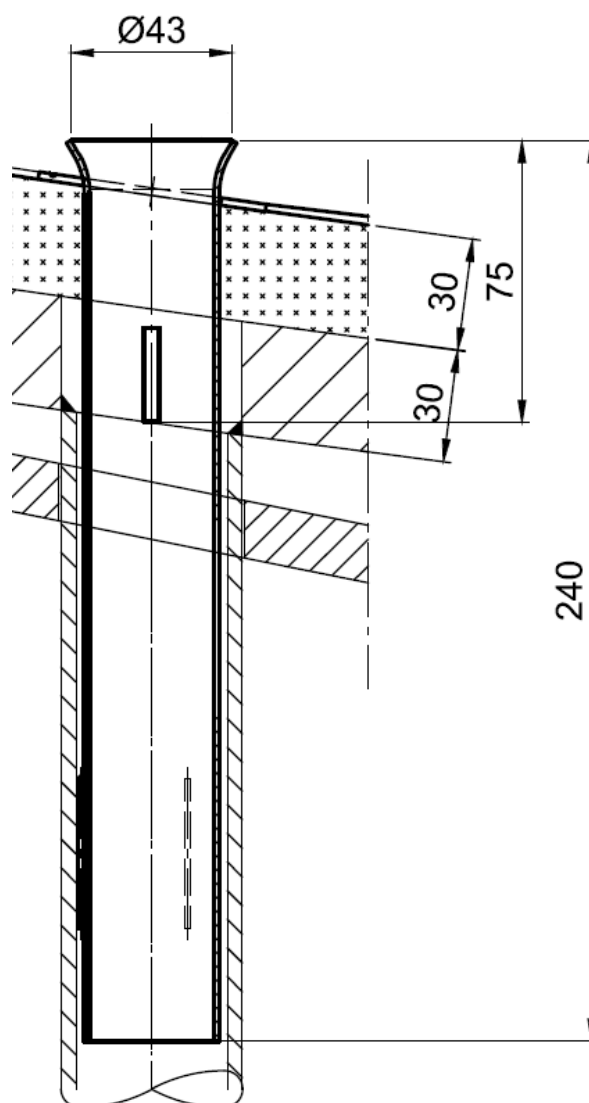
Pre neskoršie nastavenie CFD výpočtu a okrajových podmienok je potrebné jednotlivým plochám modelu priradiť názvy, resp. ich pre zjednodušenie usporiadať do väčších zoskupení a tieto následne pomenovať. S vytvorenou skupinou plôch bude možné neskôr pracovať ako s jednou entitou, čo môže značne uľahčiť zadávanie okrajových podmienok. Pre tento krok je však potrebné vytvorený model upraviť vo vhodnom programe.

V tomto prípade bol použitý program SpaceClaim, ktorý je súčasťou balíka ANSYS, kde boli vytvorené nasledujúce tzv. „Groups“, teda skupiny:

- Vtok central
- Vtok medzitrubkový priestor
- Výtok
- Symetria v rovine XY
- Symetria v rovine YZ
- Stena trubkovnice
- Stena vrchné trubky
- Stena spodné trubky+ferule
- Stena spodné trubky
- Stena central

- Stena deliaci plech
- Stena výtok
- Stena plášť

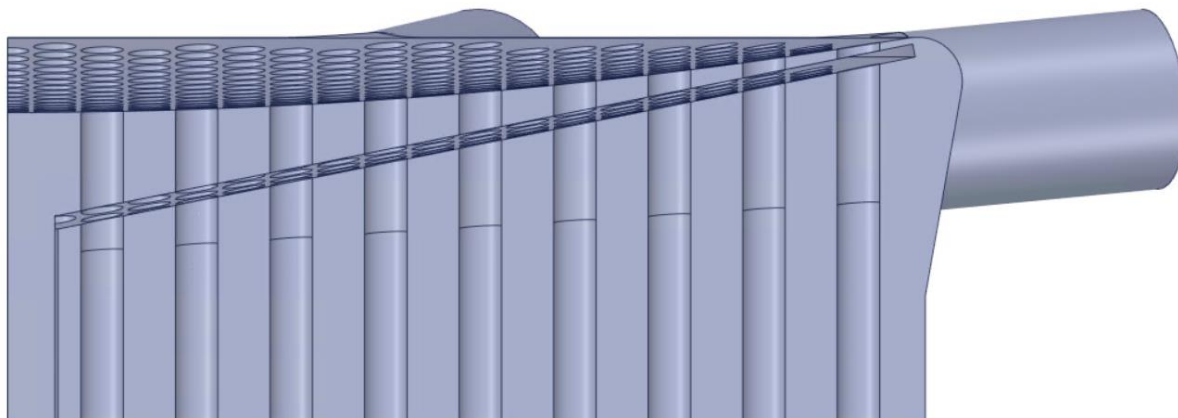
Skupiny „Stena spodné trubky+ferule“ a „Stena spodné trubky“ tvoria spoločne plochu trubiek umiestnených pod deliacim plechom. Ako možno vidieť na Obr. 21, do tejto oblasti zasahujú tzv. ferule. Tie tvoria tepelný štít trubkovnice a najexponovanejšej časti trubiek pred horúcimi nitróznymi plynmi. Jedná sa o trubky dlhé 240 mm s hrúbkou steny 1,4 mm vložené dovnútra trubiek trubkového zväzku a privarené k ich stenám. Ferule prechádzajú ako trubkovnicou, tak aj jej izoláciou a ich vrchná časť tvare kalicha prichádza do kontaktu s nitróznymi plynmi ako úplne prvá spomedzi komponentov výmenníkovej časti kotla. Izoláciu o hrúbke 30 mm zobrazenú na Obr. 21 tvorí kovová drôtenka, na ktorej je umiestnený tenký plech. Na základe konzultácie sa u takejto vrstvy a type materiálu nepredpokladá vysoká tepelná odolnosť, izolácia skôr zabraňuje priamemu kontaktu nitróznych plynov s materiálom trubkovnice.



Obr. 21 – Schéma ferule



Vzhľadom na malú hrúbku steny by sa dalo uvažovať o zanedbaní ferúl a ich vplyvu na prestup tepla stenou trubiek pri simulácii, avšak jednalo by sa opäť o zjednodušenie, ktoré znova pridá určitú chybu k výsledkom. Tento problém bol teda riešený pridaním roviny pod uhlom  $5^\circ$ , keďže ferule aj napriek tomu, že majú rovnakú dĺžku, kopírujú zakrivenie trubkovnice a teda ich koniec nie je v jednej rovine. Výsledkom bolo rozdelenie plochy spodných trubiek na 2 časti (Obr. 22) a vznik 2 skupín pomenovaných v predchádzajúcom odstavci. Takto nastavený 3D model geometrie bol použitý pre vytvorenie výpočtovej siete.



*Obr. 22 - Upravený model s rozdelením plochy spodných trubiek*

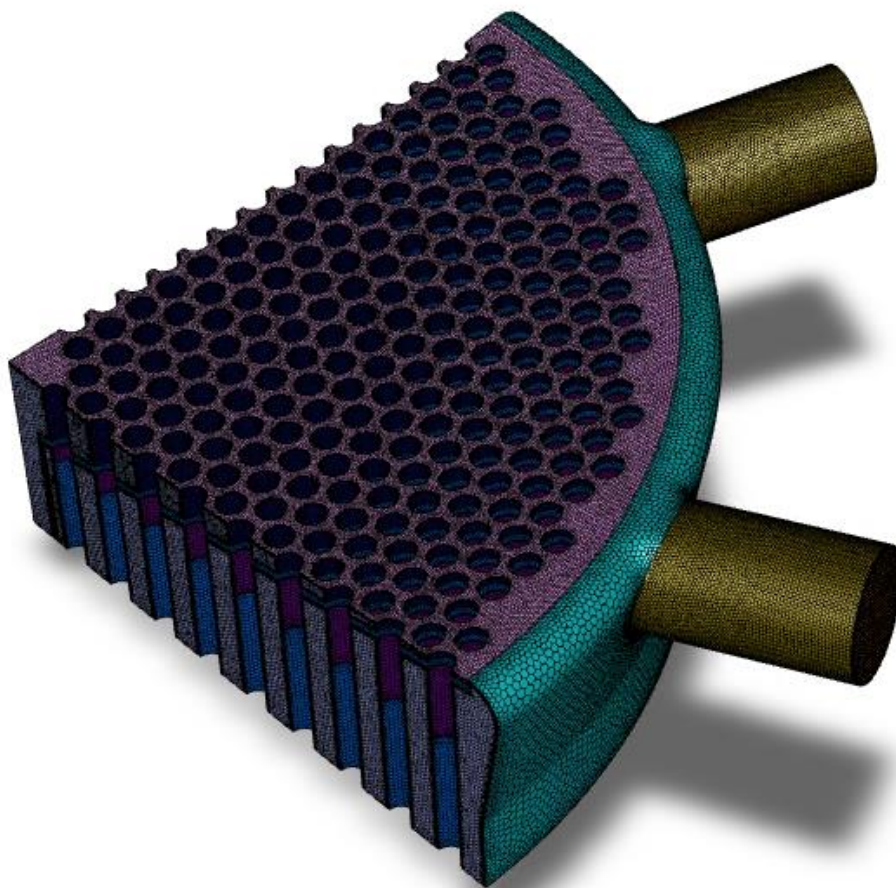
## 5.2 Výpočtová sieť

Vytvorená výpočtová sieť musí byť dostatočne hustá na to, aby numerická aproximácia mala požadovanú presnosť, avšak príliš hustá sieť môže naopak spôsobovať problémy pri získavaní výsledkov. Rozostupy a prechody medzi jednotlivými bunkami by mali byť dostatočne hladké a zjemnené na úroveň, ktorá zachytí zmeny v gradientoch. Presnosť numerického riešenia môže byť narušená skokovými zmenami v mriežke alebo prílišným zošikmením. [7]

### 5.2.1 Tvorba výpočtovej siete vo Fluent Meshing

Sieť použitá pre účely tejto práce bola vytvorená pomocou relatívne nového sieťovacieho nástroja Fluent Meshing, ktorý sa stal súčasťou programu ANSYS Fluent. Dôvodom použitia Fluent Meshingu je jeho výhoda vo vhodnosti použitia pre náročnejšie geometrie, kedy generuje relatívne kvalitné siete i bez zásahu užívateľa. Dostupné sú však i rozsiahle možnosti úpravy a adaptácie siete. Vytvorenie siete vo Fluent Meshingu prebieha v 2 krokoch – generovanie povrchovej siete (Obr. 23) a následné generovanie objemovej siete (Obr. 24).

Povrchová sieť je sieť vytvorená na plochách importovaného 3D modelu a vytvára podklad pre generovanie objemovej siete. Okrem nastavenia globálnej minimálnej a maximálnej veľkosti výpočtovej bunky, je vhodné použiť jednu z metód lokálneho dimenzovania na záujmových plochách. V rámci tejto práce bolo využité dimenzovanie veľkosti povrchovej bunky pomocou módu „Face Size“ na vybraných plochách.



Obr. 23 - Výpočtová sieť modelu

Po vygenerovaní povrchovej siete je potrebné popísať doménu a hraničné plochy. V tomto kroku je dôležité priradiť správnu okrajovú podmienku jednotlivým plochám, aby boli tieto plochy správne roztriedené po prechode do módu riešiča ANSYS Fluent. Jedná sa najmä o definíciu vstupov a výstupov, stien a plôch symetrie.

Ako je popísané na začiatku tejto kapitoly, oblasť v okolí steny domény a jej správny popis je veľmi dôležitý pre získanie relevantných výsledkov, o to viac, ak sa jedná o úlohu s prestupom tepla. Najlepším spôsobom, ako tieto javy zachytiť je vyplniť danú oblasť vyšším počtom buniek v normálovom smere na smer prúdenia. Do výpočtovej siete sa preto pridávajú tzv. prizmatické vrstvy. Jedným zo sledovaných parametrov kvality siete je napríklad pomer strán výpočtovej bunky, tzv. „aspect ratio“, ktorý u medznej vrstvy môže dosahovať hodnôt medzi 100-1000 [29]. To značí, že bunky v medznej vrstve budú značne sploštené oproti bunkám v jadre domény, kde by mali byť tieto hodnoty menšie ako 100 [30]. Zdroj [31] napríklad uvádza klasické hodnoty v rozsahu 18-20, resp. 40. Vo Fluent Meshingu je tvorba prizmatických vrstiev ako posledný krok pred tvorbou objemovej siete. Opäť existuje viac možností, ako pristupovať k tvorbe prízem:

- hladký prechod („smooth transition“) – východiskové
- uniformné („uniform“)
- pomer strán („aspect ratio“)
- posledný pomer („last ratio“)

Pri každom z týchto prístupov sa mení kombinácia vstupných parametrov. Pri vytváraní siete boli použité a odskúšané všetky prístupy, keďže pri testovacích výpočtoch malo usporiadanie prizmatických vrstiev veľký vplyv na konvergenciu úlohy. V prípade uniformného prístupu je vstupným parametrom výška prvej bunky. Tú možno odhadnúť pomocou požadovaného Courantovho čísla a známej rýchlosti v doméne. Pre účely tejto diplomovej práce sa však tento prístup ukázal ako nevhodný, keďže týmto spôsobom by doména musela obsahovať desiatky prizmatických vrstiev a výrazne by sa tak zvyšovali výpočtové nároky na hardware a čas (nad rámec možností študentskej záverečnej práce). Rovnaký výrok platí aj o prístupoch pomeru strán a poslednom pomere. U všetkých troch dosahovali navyše ukazovatele kvality siete horšie výsledky ako pri hladkom prechode.



Obr. 24 - Objemová sieť modelu v reze rovinou XY

Okrem vyššie uvedených prístupov je vstupnou veličinou počet prizmatických vrstiev. Toto je tiež veľmi dôležitý parameter, ktorý priamo ovplyvňuje presnosť výsledkov. Siete bez prizmatických vrstiev skonvergovali pomerne rýchlo na úroveň rezíduí  $10^{-5}$ . Skonvergovaná úloha však neznamená správny výsledok a je vždy potrebné získané výsledky zhodnotiť. Takáto sieť nepopisuje medznú vrstvu správne. Napríklad hodnoty  $y^+$  na stenách domény oscillovali v rozsahu 0,4 až v rádoch stoviek.

Pre určenie počtu prizmatických vrstiev je opäť potrebné sa vrátiť k počiatočnej úvahe, kde bolo treba hľadať kompromis medzi počtom buniek a presnosťou výsledkov. Pri úlohách, kde je dôležitý popis javov v okolí steny nie je výnimočným ani počet okolo 30 a viac prizmatických vrstiev [32]. Takáto sieť potom dáva veľmi presný popis dejov v okolí steny domény. Avšak pri úlohe danej veľkosti je takýto počet nereálny, keďže pridanie čo i len jednej prizmatickej vrstvy značne zvyšuje počet buniek a výpočtovú náročnosť. Boli otestované siete s tromi, piatimi, šiestimi i desiatimi prizmatickými vrstvami. Sieť s tromi použitými vrstvami umožňovala zjemňovanie siete v záujmových miestach domény pri udržiavaní akceptovateľného počtu buniek. Pri bežných úlohách však zdroje odporúčajú 5 – 15 vrstiev medzných buniek, úplným minimom sú 3 [33]. Siete so 6 a viac prizmatickými vrstvami dosahovali počty buniek cez 4 milióny, čo bolo za hranicou možností dostupného hardwaru. Výpočtové časy takýchto úloh ako aj samotné generovanie siete sa výrazne predĺžili. Úlohy boli sieťované na počítačoch Ústavu procesného inžinýrství s kapacitou RAM 16 GB a 4 fyzickými procesormi. V Tab. 8 možno vidieť vlastnosti vytvorených sietí a v Tab. 9 rozsahy hodnôt použité pri lokálnom zjemňovaní.



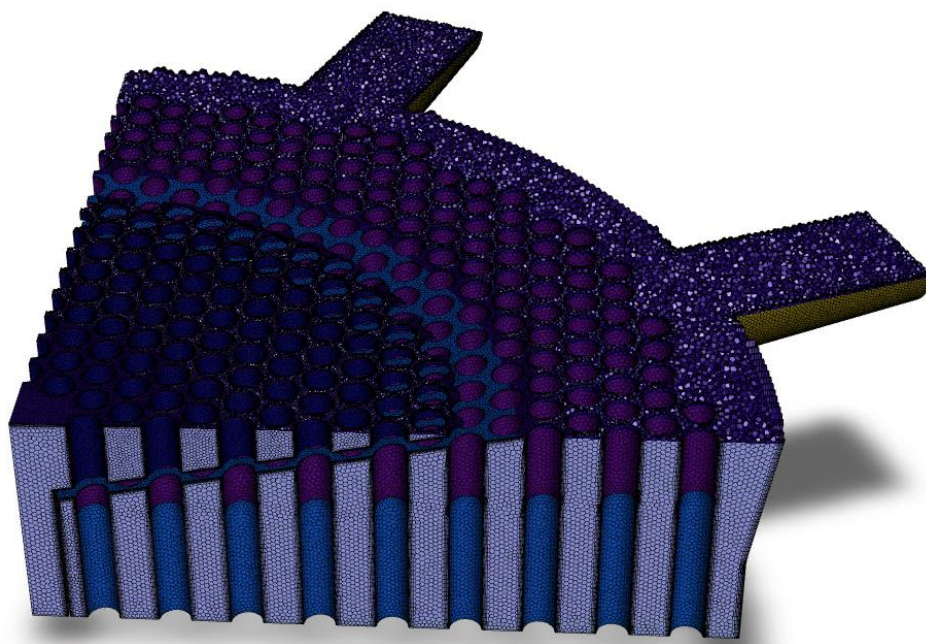
Tab. 8 - Charakteristiky výpočtových sietí

Názov siete	Počet buniek	Počet priziem	Inverzná ortogonálna kvalita	Aspect ratio
Sieť 1	773 921	0	0,20	35,2
Sieť 2	2 503 728	5	0,11	42,7
Sieť 3	2 508 855	3	0,20	41,9
Sieť 4	2 911 998	5	0,15	92,5
Sieť 5	2 958 889	5	0,20	58,9
Sieť 6	3 460 739	5	0,20	34,4
Sieť 7	3 529 033	5	0,15	85,5
Sieť 8	3 530 350	5	0,20	83,4

Tab. 9 – Rozsahy lokálneho zjemnenia použité pri tvorbe povrchovej siete

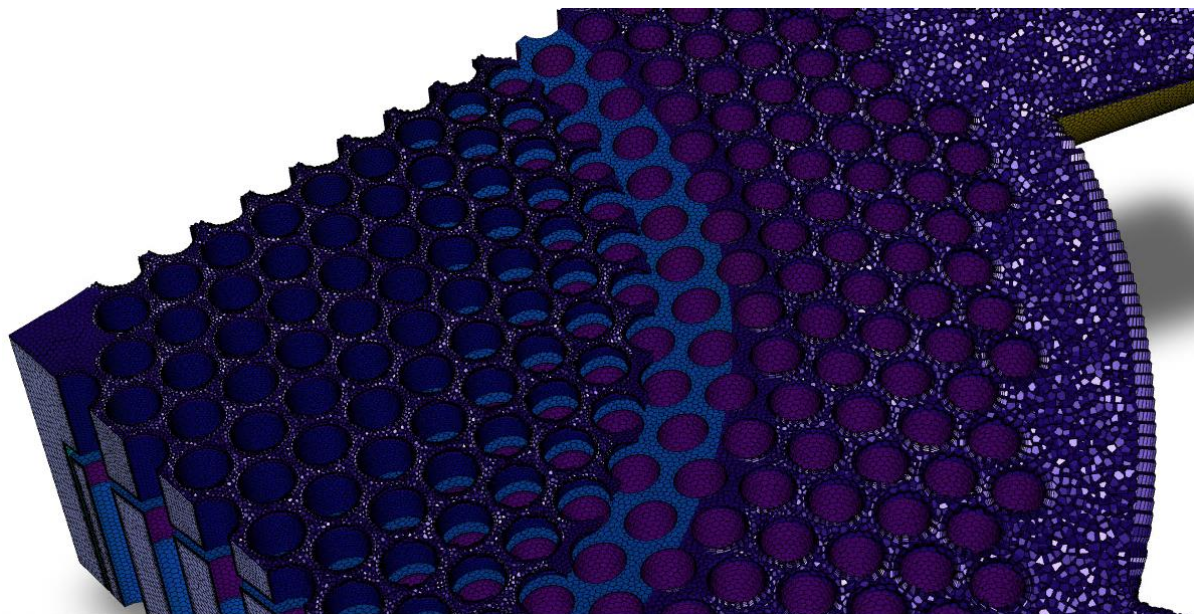
Plocha	Rozsah [mm]
Vtok central	5 – 10
Vtok medzitrubkový priestor	5 – 10
Výtok	5 – 10
Symetria v rovine XY	8 – 14
Symetria v rovine YZ	8 – 14
Stena trubkovnice	4 – 8
Stena vrchné trubky	3 – 6
Stena spodné trubky+ferule	8 – 14
Stena spodné trubky	8 – 14
Stena central	8 – 14
Stena deliaci plech	5 – 10
Stena výtok	5 – 10

Výpočtové siete v Tab. 8 sa od seba odlišujú vo veľkej miere nastavením lokálneho dimenzovania povrchovej siete, minimálnou a maximálnou dĺžkou povrchovej bunky a maximálnou dĺžkou objemovej bunky. Siete s naoko rovnakým počtom buniek teda môžu vykazovať úplne inú kvalitu.



Obr. 25 - Objemová sieť v reze rovinou XZ

Lokálne zjemnenie povrchovej siete bolo v rozličných hodnotách použité na všetky plochy okrem steny plášťa nádoby. V tejto oblasti sa už nevyskytujú trubky, preto tu boli bunky obmedzené iba globálnymi nastaveniami (Obr. 25). V niektorých sieťach bolo lokálne zjemnenie rozdelené do dvoch kategórií, kde prvou bola určitá veľkosť bunky definovaná na trubkovnici, deliacom plechu, vstupoch a výstupoch. Do druhej kategórie spadali steny trubiek. Po prvotných simuláciách sa ukázalo, že takéto jednotné nastavenie pre celú plochu trubiek nie je vhodné, pretože vo vrchnej časti domény medzi trubkovnicou a deliacim plechom boli bunky po pridaní prizmatických vrstiev zošikmené a sieť príliš hrubá, z čoho vyplývala aj zlá ortogonálna kvalita takýchto sietí. Plochy boli teda lokálne zjemňované v 3 kategóriách, kedy najväčšie zjemnenie bolo na stenách vrchnej časti trubiek (Obr. 26 a detailne Obr. 30).

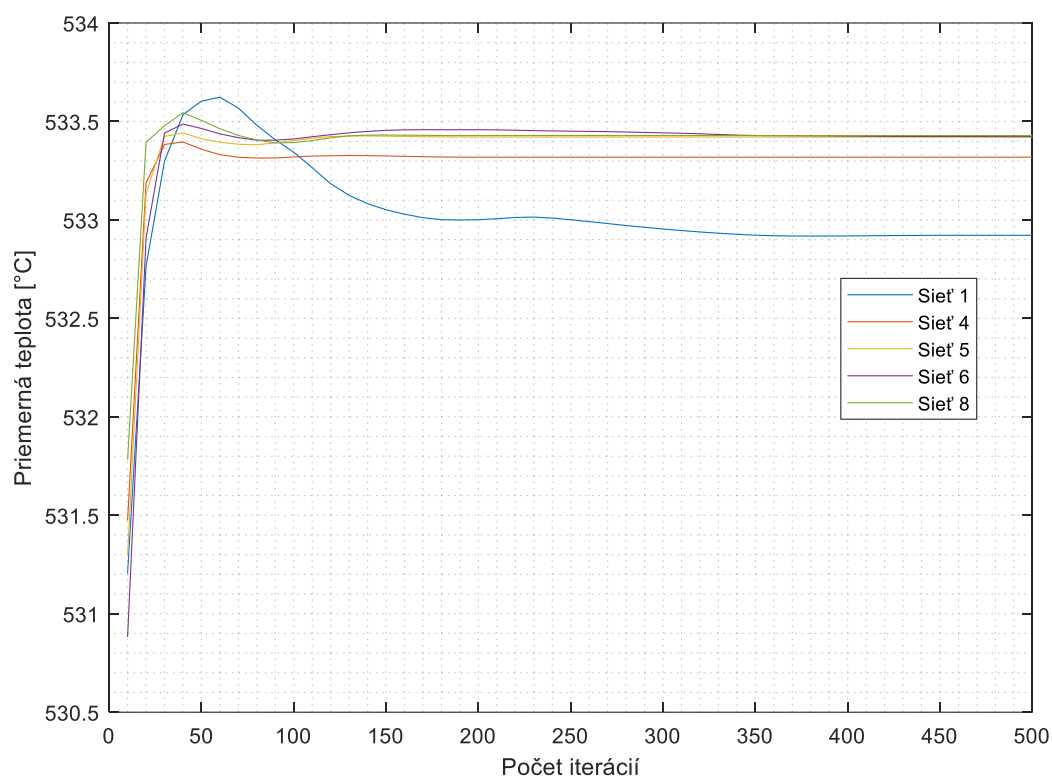


Obr. 26 - Detail reznej roviny

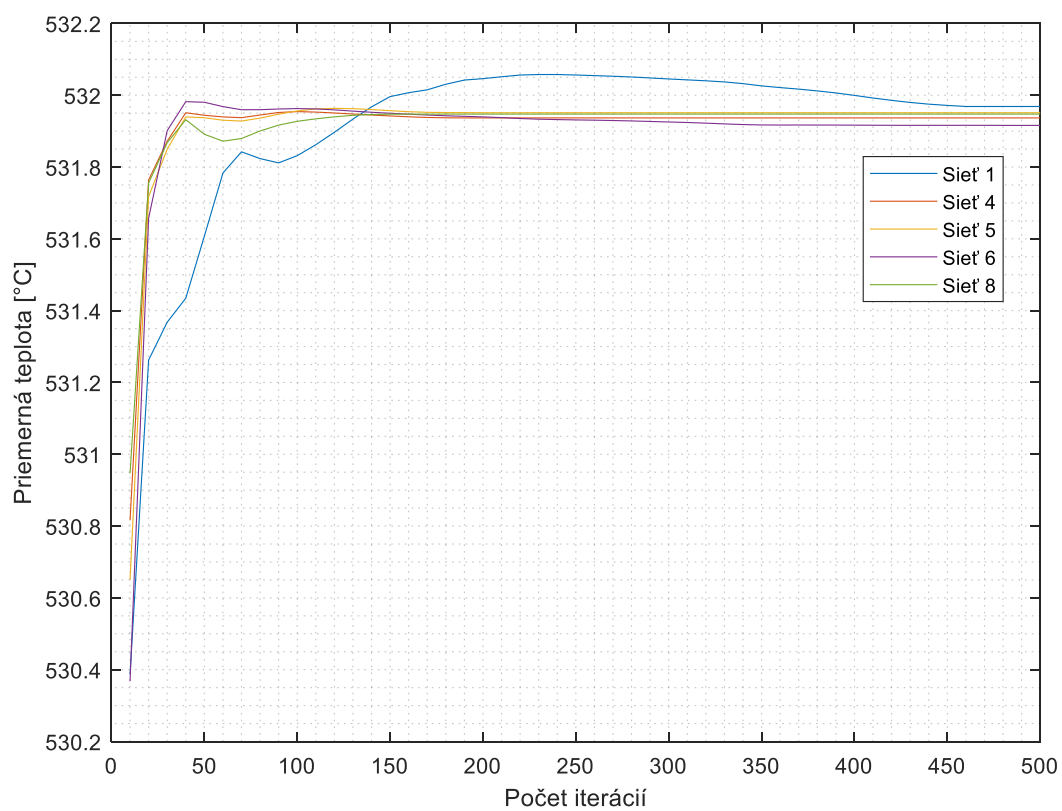
Siete s cca 2,5 milióna bunkami dosahovali dobré výpočtové časy. Sieť 2 však vo výpočte vykazovala o niekoľko rádov vyššie nerovnováhy hmotnostného toku na vstupe a výstupe domény, než by bolo žiadané. Tieto nerovnováhy vznikali v bunkách okolo steny plášťa a výstupov. Bolo teda treba tieto oblasti zjemniť o čom vypovedala aj nízka inverzná ortogonálna kvalita siete. Sieť 3 bola naopak dostatočne jemná s dobrou kvalitou, obsahovala však iba 3 prizmatické vrstvy, čo bolo vyhodnotené ako nedostatočné.

Voľba piatich prizmatických vrstiev s tempom rastu 1,2 sa ukázala ako optimálna. K takto zadanej medznej vrstve bolo potrebné nájsť optimálne úrovne zjemnenia a globálnej veľkosti buniek. Pozorovaním bolo zistené, že pri daných hardwarových podmienkach sú optimálnejšie z hľadiska výpočtového času a presnosti výsledkov siete do 3 miliónov buniek. Obzvlášť náchylným na počet buniek bolo lokálne zjemnenie vrchnej časti trubiek, ktoré pri zmene hodnoty o 1 mm (zo 4 mm na 3 mm) zvýšilo celkový počet buniek o pol milióna (siete 7 a 8).

Na Obr. 27 – Obr. 29 sú zobrazené grafy priebehu teplôt v konkrétnom bode domény pre niekoľko sietí z Tab. 8. Pre lepšiu prehľadnosť boli vybrané iba siete s vyššou ortogonálnou kvalitou a dostatočným počtom prizmatických vrstiev. Sieť 1, ktorá je bez prizmatických vrstiev, bola do grafov pridaná pre ilustráciu. Výborne totižto znázorňuje, ako sa takáto sieť bez medznej vrstvy odchyľuje od kvalitnejších. Na Obr. 27 možno vidieť, že siete 5,6 a 8 dávajú takmer rovnaké výsledky. Na ďalších grafoch možno vidieť menšie rozdiely, ako optimálna sa javí Sieť 5.

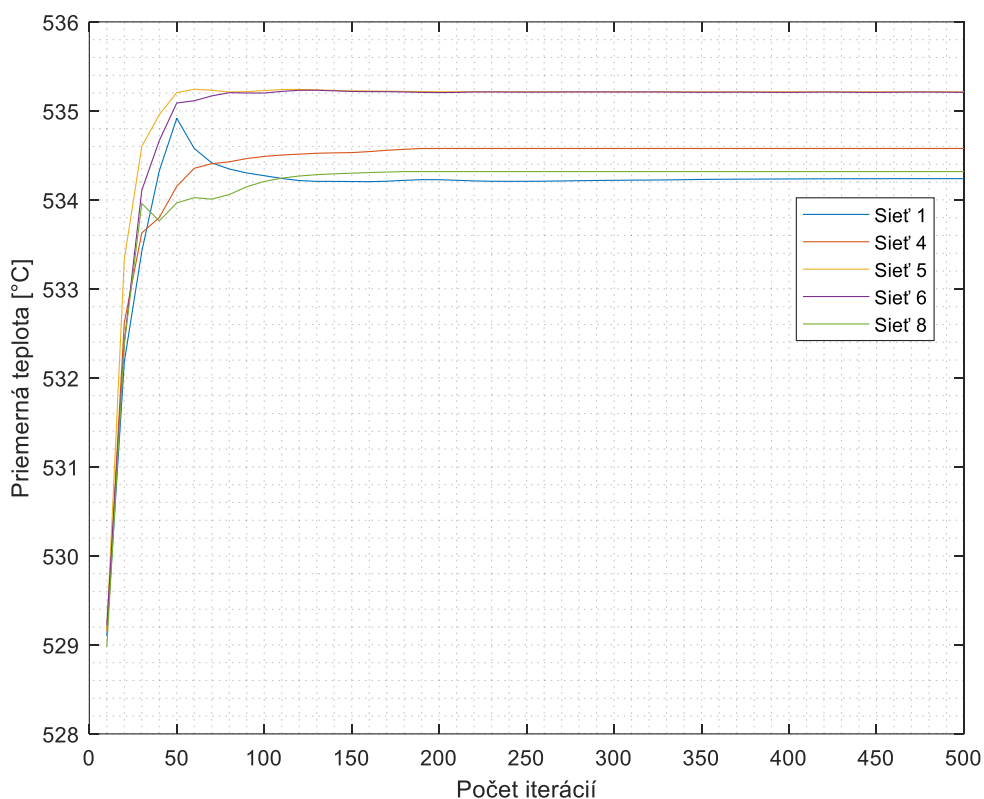


Obr. 27 - Graf teplôt v bode (1) domény pri rozličných sieťach



Obr. 28 – Graf teplôt v bode (2) domény pri rozličných sieťach

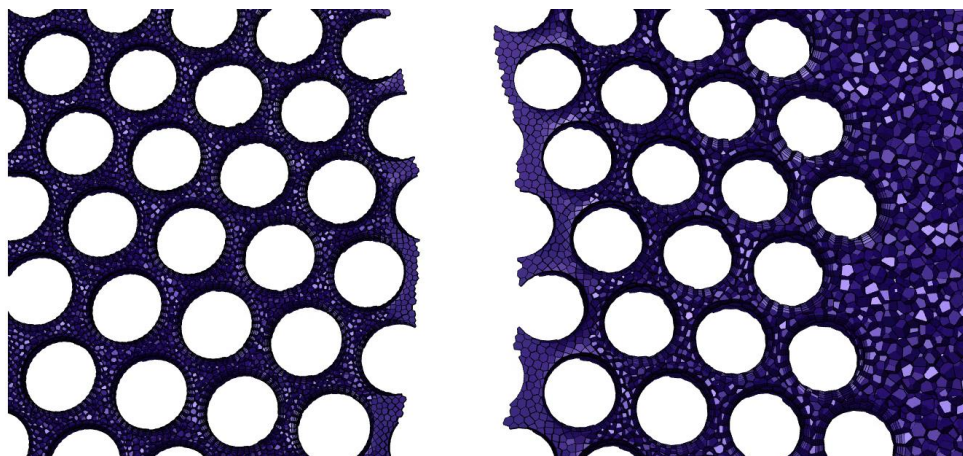




Obr. 29 – Graf teplôt v bode (3) domény pri rozličných sieťach

Sieť 5 bola vyhodnotená ako optimálna a bola zvolená pre finálny numerický výpočet. Bolo použité nasledujúce nastavenie:

- lokálne zjemnenie 4 mm – vrchná časť trubiek
- lokálne zjemnenie 6 mm – inlet, outlet, trubkovnica, deliaci plech, stena hrdiel outletu
- lokálne zjemnenie 8 mm – spodná časť plochy trubiek, plochy symetrie
- minimálna veľkosť povrchovej bunky 5 mm
- maximálna veľkosť povrchovej bunky 10 mm
- päť prizmatických vrstiev na stenách domény
- maximálna dĺžka objemovej bunky 10 mm



Obr. 30 - Rozdielna veľkosť siete v oblasti nad a pod deliacim plechom

### 5.3 Materiálový model

Materiály fluidného charakteru použité v CFD simulácii boli voda (kvapalina) a vodná para (plyn). Proporcie týchto materiálov boli upravené pre daný tlak na základe zdroja [34]. Použité proporcie fluidných materiálov sú zobrazené v Tab. 10.

Tab. 10 - Proporcie fluidných materiálov [34]

<b>Voda</b>	
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	785,534
Merné skupenské teplo [ $\text{J/kg.K}$ ]	4 970
Tepelná vodivosť [ $\text{W/m.K}$ ]	0,6108
Viskozita [ $\text{kg/m.s}$ ]	1,0221e-4
Molárna hmotnosť [ $\text{kg/kmol}$ ]	18,015
Entalpia [ $\text{J/kg.mol}$ ]	-2,858e+8
Referenčná teplota [ $\text{K}$ ]	531,93
<b>Para</b>	
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	23,224
Merné skupenské teplo [ $\text{J/kg.K}$ ]	4 269
Tepelná vodivosť [ $\text{W/m.K}$ ]	0,6108
Viskozita [ $\text{kg/m.s}$ ]	1,0221e-4
Molárna hmotnosť [ $\text{kg/kmol}$ ]	18,0152
Entalpia [ $\text{J/kg.mol}$ ]	-2,858e+8
Referenčná teplota [ $\text{K}$ ]	531,93

Výpočtový model neobsahuje žiadne pevné telesá (tzv. solidy). Obsahuje však diabatické steny, na ktoré bude zadávaná termálna okrajová podmienka. Materiály týchto stien teda boli doplnené do materiálového modelu a nastavené na príslušné steny. Ich proporcie sú uvedené v Tab. 11.

Tab. 11 - Proporcie pevných materiálov [35, 36]

<b>EN 1.5415</b>	
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	7 900
Merné skupenské teplo [ $\text{J/kg.K}$ ]	470
Tepelná vodivosť [ $\text{W/m.K}$ ]	49
<b>EN 1.7335</b>	
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	7 900
Merné skupenské teplo [ $\text{J/kg.K}$ ]	470
Tepelná vodivosť [ $\text{W/m.K}$ ]	49

### 5.4 Okrajové podmienky výpočtu

Okrajové podmienky sú obmedzenia potrebné pre riešenie úloh s medznou hodnotou. Takouto úlohou je diferenciálna rovnica, resp. systém diferenciálnych rovníc, ktorý sa má vyriešiť v doméne, na hranici ktorej je známa množina podmienok. Takýmto problémom sú i úlohy spojené s mechanikou tekutín a prestupom tepla. Teda diferenciálne rovnice, obyčajné a parciálne, potrebujú k získaniu riešenia okrajové podmienky. Voľba správnej okrajovej podmienky je fundamentálna pre vyčíslenie numerickej úlohy. Nesprávne zadefinovanie okrajovej podmienky môže viesť k divergencii riešenia alebo ku konvergencii k nesprávnym výsledkom. [37]



V prípade problému riešeného v tejto diplomovej práci bolo dôležité okrem zadania materiálových a bilančných (hmotnostných) podmienok aj správne zadanie termálnych okrajových podmienok. Konečné hodnoty sú uvedené v Tab. 12 – Tab. 15.

Tab. 12 - Okrajové podmienky na vtoku (inlet)

Názov	Typ okrajovej podmienky	Prietok [kg/s]	Teplota [K]	Prietok voda	Prietok para
Vtok central	Vtok s predpísaným hmotnostným prietokom	1,746	528,15	1,746	0
Vtok MP	Vtok s predpísaným hmotnostným prietokom	85,549	528,15	81,270	4,279

Tab. 13 - Okrajové podmienky na výtoku (outlet)

Názov	Typ okrajovej podmienky	Pretlak [Pa]	Teplota [K]
Výtok	Výtok s predpísaným tlakom	0	528,15

Tab. 14 - Okrajové podmienky na stenách

Názov	Typ okrajovej podmienky	Tepelná podmienka
Stena plášťa	Statická stena – bez sklzu	Adiabatická stena
Stena central	Statická stena – bez sklzu	Adiabatická stena
Stena deliaci plech	Statická stena – bez sklzu	Adiabatická stena
Stena výtok	Statická stena – bez sklzu	Adiabatická stena
Stena trubkovnice	Statická stena – bez sklzu	Konvekcia
Stena vrchné trubky	Statická stena – bez sklzu	Konvekcia
Stena spodné trubky+ferule	Statická stena – bez sklzu	Konvekcia
Stena spodné trubky	Statická stena – bez sklzu	Konvekcia

Tab. 15 - Termálne okrajové podmienky na diabatických stenách

Názov	Súčiniteľ prestupu tepla [ $W/(m^2.K)$ ]	Hrúbka steny [mm]
Stena trubkovnice	59,63	0,03
Stena vrchné trubky	59,63	0,0054
Stena spodné trubky+ferule	59,63	0,0054
Stena spodné trubky	59,63	0,004

Väčšina údajov bola získaná z procesných dát [20] alebo konzultáciou s technologom prevádzky KD3, Ing. Michalom Geschwandtnerom. Pracovný tlak v plášťovej strane – teda na strane vody, je 4,6 MPa (a). Teplota vody vstupujúcej do kotla bola približne odhadnutá na 528,15 K, čo je o cca 3 K nižšia hodnota než je saturačná teplota pri danom tlaku. Prietok stredovou trúbkou na chladenie trubkovnice bol odhadnutý ako 2 % z celkového prietoku cirkulačného systému kotlovej vody. Hmotnostný zlomok parnej frakcie na výtoku predstavuje 0,052.



## 6 Numerické analýzy

Nasledujúca kapitola popisuje použité numerické modely pre výpočtový model a ich nastavenie. Začína popisom jednofázových steady-state výpočtov, cez tranzientné jednofázové simulácie až po tranzientné dvojfázové.

### 6.1 Steady-state výpočty

Simulovanie tvorby parnej fázy, ktoré má za cieľ táto práca, je až posledným krokom procesu a predchádza mu veľký počet testovacích a doladovacích výpočtov. Napriek tomu, že finálny výpočet pre simuláciu tvorby parnej fázy je časovo závislý, teda tranzientný, pomocné výpočty pre doladenie modelu možno vykonávať i v steady-state forme, v závislosti od účelu, resp. meneného parametru. Testovacie výpočty boli dôležité už pri vytváraní siete podľa kapitoly 5.2, kde bolo potrebné sledovať rýchlostné pole a hodnoty  $y^+$  a prispôbovať na základe výsledkov jemnosť a kvalitu siete v jednotlivých oblastiach domény.

V prípade tejto diplomovej práce je dôležité zadanie termálne okrajovej podmienky na teplovýmenných stenách aparátu. ANSYS Fluent ponúka niekoľko možností, ako zadať uvedenú okrajovú podmienku:

- 1) Konštantný tepelný tok
- 2) Teplota steny
- 3) Prestup tepla konvekciou
- 4) Prestup tepla radiáciou
- 5) Pomocou couplingu

Pri riešenej úlohe a dostupných dátach sú relevantné iba možnosti (1) a (3). Z procesných dát [20] možno vyčítať výkon trubiek výmenníkovej časti kotla a z výkresu [17] teplovýmennú plochu trubiek. Na základe týchto hodnôt a pri uvažovaní lineárneho rozloženia tepelného výkonu po dĺžke výmenníku možno vyčíslieť hodnotu tepelného výkonu vzťahnutého na jednotku plochy, čo je riadiaci parameter okrajovej podmienky tepelného toku. Hodnota merného tepelného toku by teda vychádzala z rovnice (4):

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}_c}{A_c} = \frac{30\,121\,100}{933,6} = 32\,263 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

- $\dot{q}$  merný tepelný tok [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $\dot{Q}_c$  celkový tepelný tok [W]  
 $A_c$  celková teplovýmenná plocha [ $\text{m}^2$ ]

Použitie tejto podmienky sa však pri danej úlohe, aj po konzultácii s vedúcim práce, nejavilo ako vhodné. Dochádzalo k problémom s konvergenciou úlohy nakoľko je táto podmienka pomerne tvrdá a i z fyzikálneho hľadiska nekopíruje reálne deje do takej miery, ako napríklad okrajová podmienka konvekcie.

Okrajová podmienka konvekcie popisuje prestup tepla doménou s uvažovaním napočítaného rýchlostného poľa. Jej použitie je tak vhodnejšie pre popis prestupu tepla trubkovnicou. Táto okrajová podmienka má viac vstupných parametrov než predchádzajúca podmienka. Okrem externého súčiniteľa prestupu tepla je potrebné uviesť teplotu prúdu na externej strane steny

a hrúbku steny. Problematický však bol odhad súčiniteľa prestupu tepla. Ako uvádza teoretický manuál ANSYS Fluent [7], zadávaný súčiniteľ prestupu tepla je súčiniteľ prestupu tepla na externej strane steny. Keďže nebolo možné dohľadať relevantné hodnoty súčiniteľa prestupu tepla pre nitrózne plyny – oceľ, bol tento problém riešený testovacími simuláciami.

Sledovaným parametrom bol potom tepelný výkon na stenách trubiek, keďže hodnota ich tepelného výkonu pre celú dĺžku výmenníku je známa a takisto je známa ich celková teplovýmenná plocha. Po prepočítaní na namodelovanú teplovýmennú plochu trubiek bola obdržaná cieľová hodnota tepelného výkonu, ku ktorej je potrebné sa výpočtom priblížiť, podľa rovnice (5):

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_c \cdot \frac{A_m}{A_c} = 30\,121\,100 \cdot \frac{12,28}{933,6} = 396\,194\,W \quad (5)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

$\dot{Q}_m$	tepelný výkon modelu [W]
$\dot{Q}_c$	celkový tepelný výkon [W]
$A_m$	teplovýmenná plocha trubiek modelu [m <sup>2</sup> ]
$A_c$	celková teplovýmenná plocha trubiek [m <sup>2</sup> ]

Prvotný odhad súčiniteľa prestupu tepla bol určený podľa rovnice (6). Neznámym parametrom je v tomto prípade okrem súčiniteľa prestupu tepla aj teplota steny trubky na strane plynov. Pre prvotný odhad bola jej hodnota zvolená na 570 K.

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} = \frac{30\,121\,100}{933,6 \cdot (1078 - 570)} = 63,5\,W/(m^2K) \quad (7)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

$Q$	tepelný výkon [W] [20]
$\alpha$	súčiniteľ prestupu tepla na strane plynu [W/m <sup>2</sup> K]
$A$	teplovýmenná plocha [m <sup>2</sup> ] [17]
$\Delta t$	rozdiel teplôt v prúde média a teploty steny [K] [20]

Po vyjadrení a dosadení číselných hodnôt do rovnice (7) bola hodnota súčiniteľa prestupu tepla zadaná do okrajovej podmienky konvekcie na prislúchajúce steny. Výsledok simulácie naznačoval príliš vysokú hodnotu súčiniteľa, preto nasledovalo znižovanie jeho hodnoty. Takýmto iteračným spôsobom a s využitím linárnej interpolácie po obdržaní viacerých výsledkov bolo nakoniec možné určiť hodnotu súčiniteľa prestupu tepla s presnosťou na dve desatinné miesta (Tab. 15), ktorej použitie dáva tepelný výkon s rozdielom cca  $\Delta \dot{Q} = 60\,W$  od hodnoty vypočítanej podľa rovnice (5). Kredibilita výsledkov bola sledovaná pomocou rezíduí, resp. rozdielu hmotnostných prietokov na vstupe a výstupe. Úroveň rezíduí transportných rovníc bola nastavená na 1e-4, okrem rovnice energie, ktorej rezíduá boli na úrovni 1e-6. Spočiatku vznikali problémy s konvergenciou tejto úlohy. Zvýšenie rezíduí o jeden rád nahor by konvergencii pomohlo, no negatívne by sa to odrazilo na výsledkoch

bilancie hmotnostných tokov, ktorých požadované rezíduá boli na úrovni  $1e-4 - 1e-6$ . Tento problém bol nakoniec riešený aplikovaním možnosti HOTR (High Order Term Relaxation). Podľa teoretického manuálu [7] je táto možnosť vhodná v prípadoch, kedy sú pre výpočet konzervačných rovníc použité vyššie rády a úloha vykazuje nestabilitu. Na základe niekoľkých testovacích simulácií bola zvolená východzia hodnota 0,25.

Na základe rešerše v podkapitole 3.4 a odporúčaní podľa zdroja [7] bol ako model turbulencie použitý model  $k-\varepsilon$  so zapnutou možnosťou *vylepšeného spracovania steny* (z angl. „*enhanced wall treatment*“). Použité nastavenie diskretizačných metód pre steady-state výpočty ilustruje Tab. 16.

Tab. 16 - Diskretizačné metódy použité pre Steady-state výpočty

<b>Prepojenie tlaku a teploty</b>	
<i>Schéma</i>	„Coupled“
<b>Priestorová diskretizácia</b>	
<i>Gradient</i>	„Least Squares Cell Based“
<i>Tlaková diskretizácia</i>	„PRESTO!“
<i>Rovnica hybnosti</i>	„Second Order Upwind“
<i>Turbulentná kinetická energia</i>	„Second Order Upwind“
<i>Rýchlosť turbulentného rozptýlenia</i>	„Second Order Upwind“
<i>Rovnica energie</i>	„Second Order Upwind“

Spolu s vyššie uvedeným nastavením diskretizácie bol uvažovaný pseudo-tranzientný priebeh, HOTR relaxácia tokových premenných o hodnote 0,25 a časová relaxácia vo forme Time Scale Factor = 0,8. Výsledky steady-state simulácií sú popísané v nasledujúcej podkapitole.

### 6.1.1 Výsledky steady-state výpočtov

Pri vyhodnocovaní steady-state simulácií bola sledovaná hmotnostná a tepelná bilancia výpočtu. Výsledky sú uvedené v Tab. 17 a Tab. 18.

Tab. 17 - Hmotnostná bilancia steady-state úlohy (údaje sú v [kg/s])

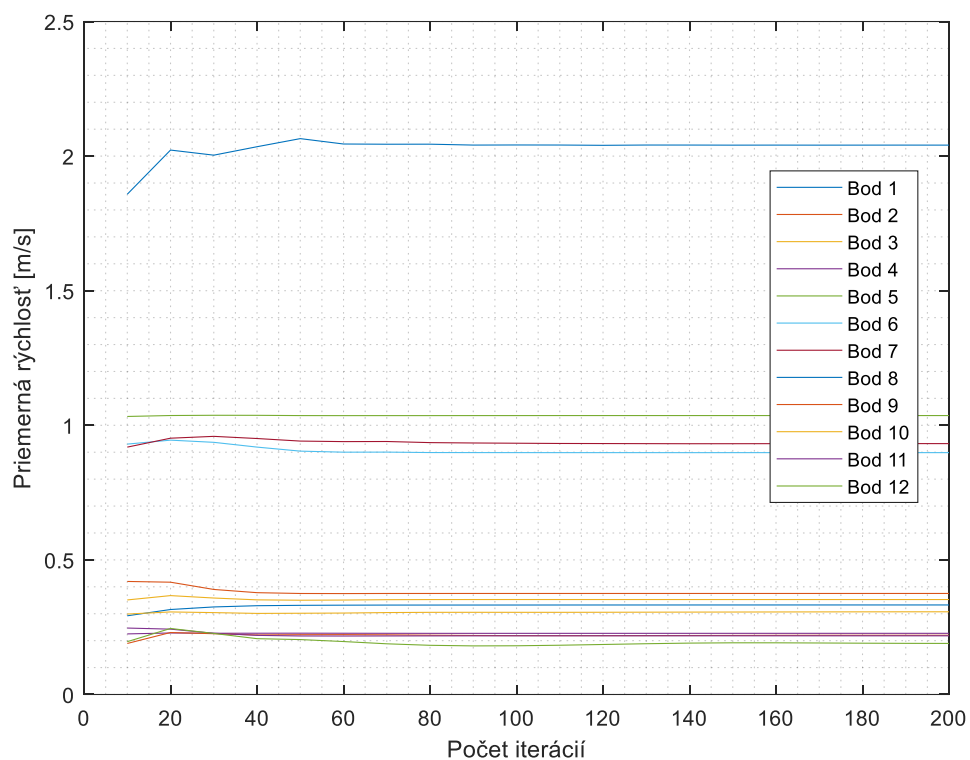
Hmotnostný tok na vtokoch	87,295
Hmotnostný tok na výtokoch	-87,294998
Rozdiel v hmotnostnej bilancii	1,174e-6

Tab. 18 - Tepelná bilancia trubiek pri stedy-state úlohe (údaje sú vo wattoch [W])

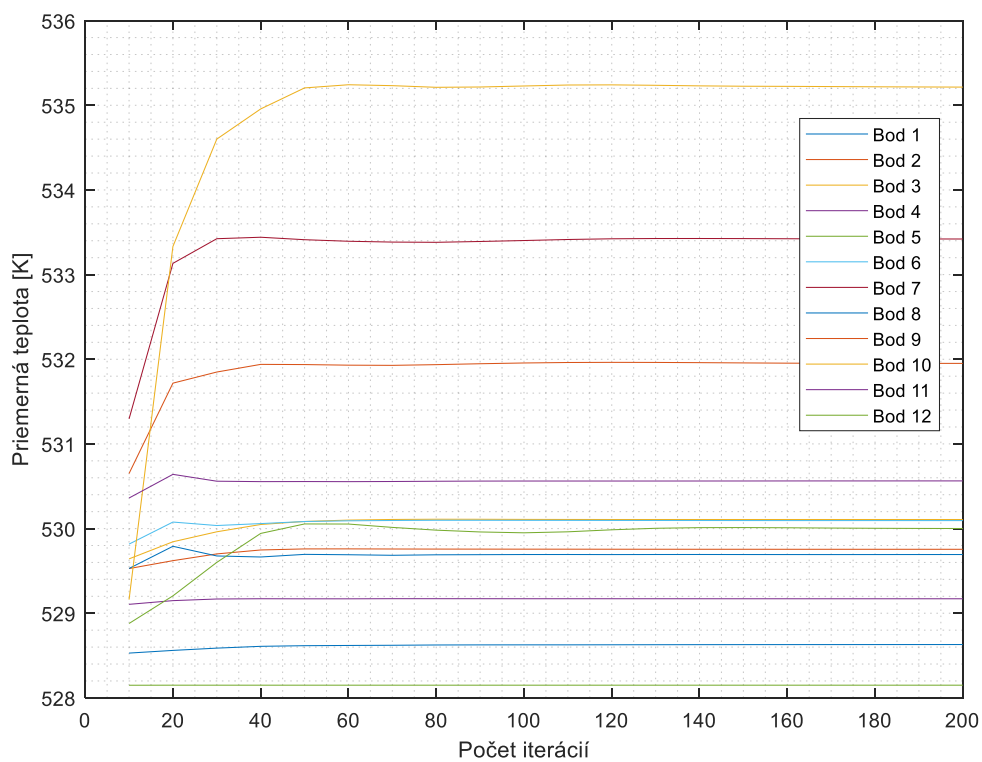
Tepelný tok stenou vrchných trubiek	105 214
Tepelný tok stenou spodných trubiek+ferule	252 630
Tepelný tok stenou spodných trubiek	38 408
Celkový tepelný tok	396 252

Hodnotu celkového tepelného toku možno porovnať s hodnotou zo vzorca (5). Ich rozdiel  $\Delta \dot{Q} = 60 \text{ W}$  je v kontexte dosahovaných hodnôt zanedbateľný. Pri takto nastavenej okrajovej podmienke možno určiť tepelný tok trubkovnicou, ktorý predstavuje 13 213,7 W.

Steady-state výpočet dáva prvotný popis rýchlostného poľa, no nezachytí niektoré periodicity ako tranzientný výpočet. Z výsledkov boli vyhodnocované rýchlosti a teploty na záujmových plochách domény, ako trubkovnica, trubky alebo outletry. Získané výsledky sú zobrazené na Obr. 31 – Obr. 38.

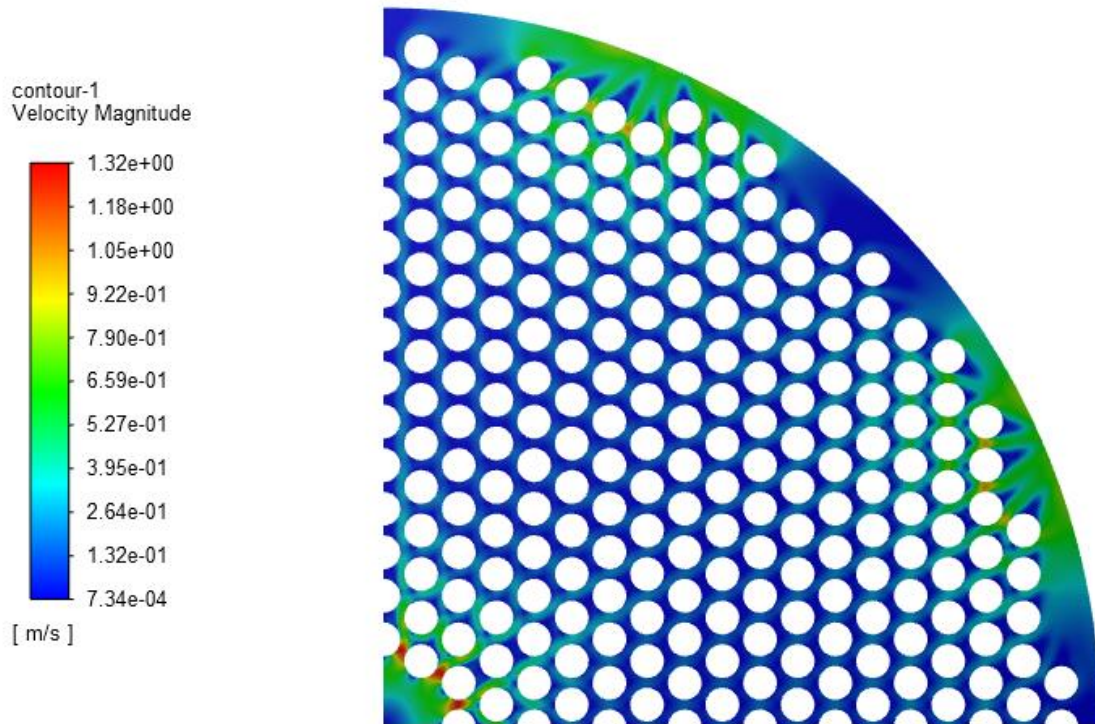


Obr. 31 - Graf vývoja rýchlostí v jednotlivých bodoch domény

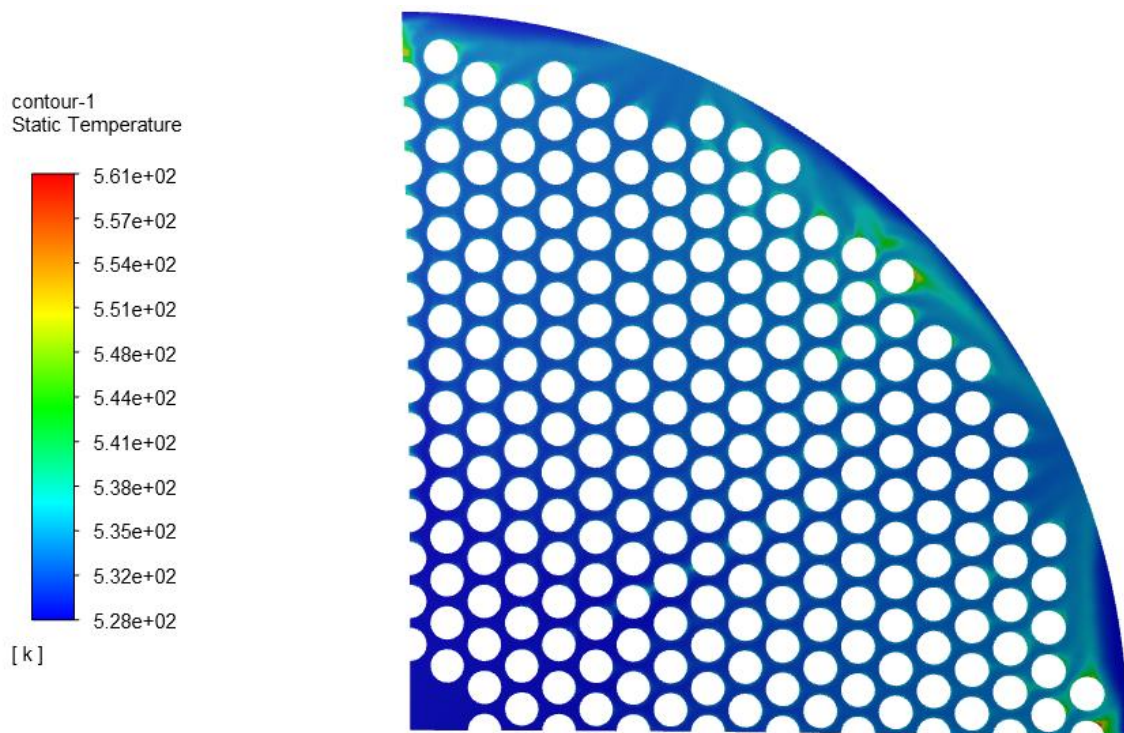


Obr. 32 - Graf vývoja teplôt v jednotlivých bodoch domény

Z grafov na Obr. 31 a Obr. 32 možno vyčítať počet iterácií potrebných na ustálenie rýchlostí a teplôt v rôznych bodoch domény. Na Obr. 33 je znázornená kontúra veľkosti rýchlostí v blízkosti steny trubkovnice. Z výsledkov možno konštatovať, že vyššie rýchlosti sa objavujú v miestach výtokov z domény. V oblastiach medzi nimi sú dosahované rýchlosti menšie.



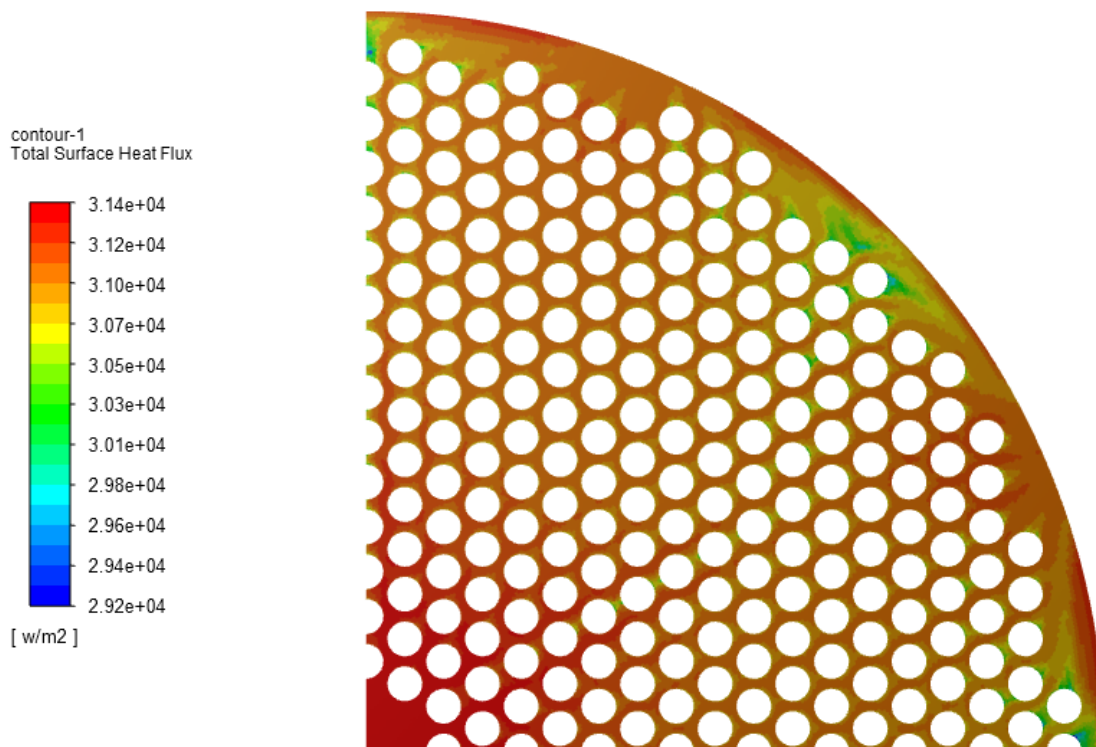
Obr. 33 - Rýchlosť prúdenia v blízkosti trubkovnice



Obr. 34 - Teplota na stene trubkovnice



Teplota na stene trubkovnice (Obr. 34) je ovplyvnená rýchlosťou prúdenia v doméne. V oblastiach s menšou rýchlosťou možno pozorovať lokálne zvýšenie teploty steny trubkovnice. Naopak v oblasti výtokov je teplota nižšia. Na Obr. 35 je zobrazená kontúra tepelného toku stenou trubkovnice a na Obr. 36 kontúra povrchového súčiniteľa prestupu tepla.



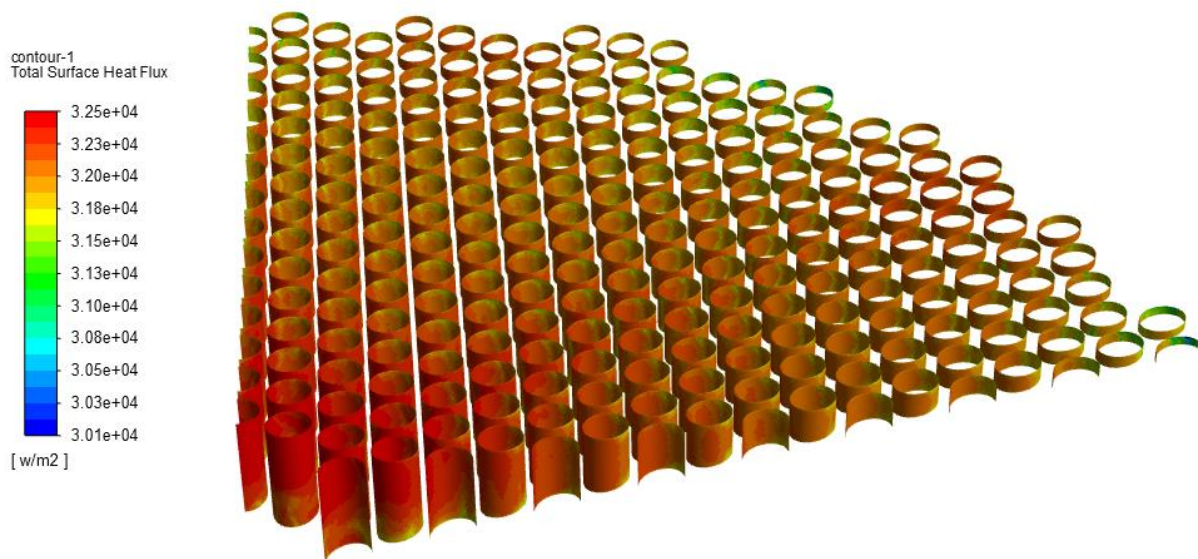
Obr. 35 - Tepelný tok trubkovicou



Obr. 36 - Súčiniteľ prestupu tepla na povrchu trubkovnice

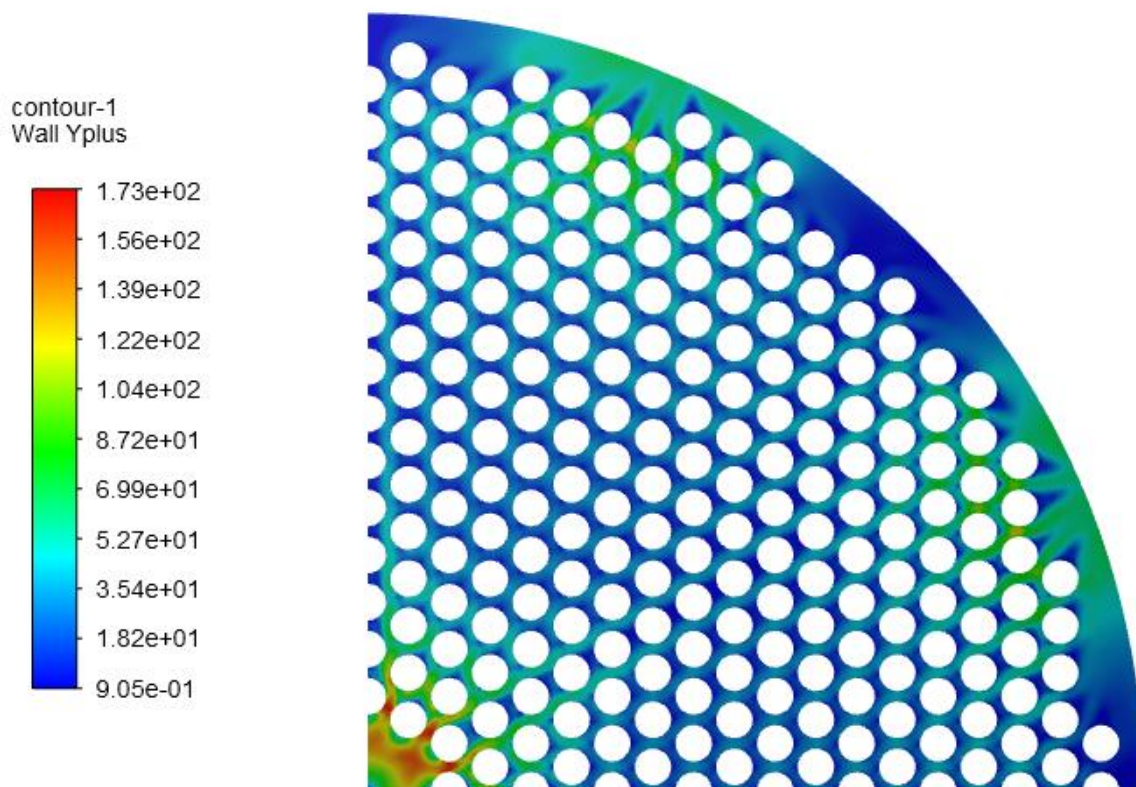


Použitie okrajovej podmienky konvekcie sa prejavilo na tepelnom toku stenou, ktorý kopíruje tok rýchlostného poľa, ako aj povrchový súčiniteľ prestupu tepla na strane vody. Dávajú tak lepší fyzikálny popis javov prebiehajúcich v tomto výmenníku a v okolí trubkovnice. Uvedené platí aj pre oblasť horných trubiek (Obr. 37), ktorých tepelný tok takisto odráža vplyv prúdenia.



Obr. 37 - Tepelný tok trubkami

Kontúra na Obr. 38 vyjadruje hodnoty bezrozmernej veličiny  $y^+$  na stene trubkovnice, ktoré sa pohybujú v celkovom rozsahu 0,9 – 173. Pre doménu sú však typické hodnoty medzi 35 až 80.



Obr. 38 - Hodnoty  $y^+$  na stene trubkovnice

## 6.2 Dvojfázový model

Po vykonaní jednofázových testovacích steady-state výpočtov možno pristúpiť k zadefinovaniu viacfázového modelu. Pri všetkých viacfázových modeloch je potrebné zvoliť explicitnú alebo implicitnú formuláciu. Pri explicitnej formulácii ANSYS Fluent využíva štandardné konečno-objemové interpolačné schémy a aplikuje ich na objemové zlomky získané v predchádzajúcom časovom kroku. Z toho vyplýva, že pri explicitnej formulácii musí byť riešená úloha časovo závislá – tranzientná. Nevyžaduje však iteratívne riešenie prenosovej rovnice v každom časovom kroku, ako je to je u implicitnej formulácie. Implicitná formulácia pracuje s hodnotami objemových zlomkov v aktuálnom časovom kroku (na rozdiel od explicitnej, ktorá pracuje s predchádzajúcim časovým krokom). Štandardná skalárna prenosová rovnica je riešená iteračne pre každý z objemových zlomkov sekundárnych fáz v každom časovom kroku. [7]

Proces riešenia viacfázových úloh je zo svojej podstaty veľmi zložitý a možno očakávať problémy so stabilitou alebo konvergenciou úlohy. Pri riešení časovo závislých problémov je potrebné pracovať so správnym počiatočným poľom z dôvodu predchádzania nestabilitám úlohy, ktoré často vznikajú práve jeho neadekvátnym popisom. Pokiaľ si navyše riešenie vyžaduje numerické schémy vyššieho rádu, je odporúčané začínať s malým časovým krokom a ten zvyšovať po vykonaní niekoľkých časových krokov pre získanie lepšieho popisu tlakového poľa. Veľkosť časového kroku  $\Delta t$  je obmedzená Courant-Friedrichs-Lewyho podmienkou, skrátene CFL podmienka. Je to podmienka pre numerickú stabilitu explicitnej formulácie numerickej schémy, ktorá vyžaduje, aby pomer rýchlosti šírenia fyzikálnej poruchy k rýchlosti šírenia numerického signálu neprekročil hodnotu 1. Matematický zápis založený na rýchlosti je uvedený v rovnici (8) [7, 38, 39]:

$$Co = v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (8)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

Co	Courantovo číslo [-]
$v$	Rýchlosť prúdenia [m/s]
$\Delta t$	veľkosť časového kroku [s]
$\Delta x$	veľkosť bunky [m]

Pre výpočet Courantovho čísla využíva ANSYS Fluent využíva i definičný vzťah založený na prietoku (9), kedy rozdelí objem každej bunky sumou odchádzajúcich prúdov. Výsledný čas potom predstavuje čas, za ktorý kvapalina opustí výpočtovú bunku. [7]

$$Co = \frac{\Delta t}{V} \sum U_f \quad (9)$$

kde jednotlivé symboly predstavujú nasledovné veličiny:

Co	Courantovo číslo [-]
$\Delta t$	veľkosť časového kroku [s]
$V$	objem bunky [m <sup>3</sup> ]
$\sum U_f$	suma odchádzajúcich prúdov [m <sup>3</sup> /s]

Východzia hodnota pre Globálne Courantovo číslo pri modelovaní viacfázového toku je rovná 2, čo znamená, že odhadovaný časový krok je dvakrát väčší ako čas prechodu cez bunku. Optimálna hodnota Courantovho čísla sa môže líšiť prípad od prípadu. Obecné platí, že pri použití explicitnej formulácie je východzia hodnota 2 odporúčaná pre presnosť okamžitého výsledku, v prípade časovo-priemerovaného výsledku možno použiť vyššie hodnoty, maximálne však 5. Čo sa týka implicitnej formulácie, v okamžitom čase by sa hodnota Courantovho čísla mala byť 2 s použitím diskretizácie prvého rádu, resp. 5 pri použití vyššieho rádu. Pre časovo priemerované výsledky možno použiť hodnotu až do 20. [7]

Na základe vykonanej rešerše a popisu jednotlivých modelov v podkapitole 3.2 bol pre simuláciu zvolený model VOF. Tento model sa však po napočítaní určitého času prúdenia ukázal byť ako nevhodný pre danú aplikáciu. Bolo teda potrebné zmeniť stratégiu. Ako model pre dvojfázový výpočet bol napokon zvolený Eulerovský model.

Viacfázové výpočty boli vykonávané na serveri EKO Ústavu procesného inžinýrství VUT v Brne. Tento server disponuje tromi výpočtovými uzlami, pričom každý z nich má k dispozícii iné množstvo procesorových jadier a iné kapacity RAM pamäte. Pre CFD výpočty v tejto diplomovej práci bol primárne využívaný hlavný výpočtový uzol, ktorý disponuje Intel® Core™ procesorovou jednotkou s 12 fyzickými a 24 virtuálnymi jadrami. Použitie virtuálnych jadier (hyperthreading) ale v kontexte CFD simulácií nemá relevantné využitie. Na výpočty bolo teda používaných 12 jadier. Zároveň tento uzol disponuje najväčšou kapacitou RAM pamäte.

### 6.2.1 Nastavenie Eulerovského viacfázového modelu

Pri Eulerovskom viacfázovom modeli bola zvolená implicitná formulácia. Pokiaľ nie je uvedené inak, všetky parametre boli volené na základe odporúčaní v teoretickom manuáli [7]. Eulerovskému modelu sa venuje v rozsahu desiatok strán a skutočne kopíruje komplexnosť daného modelu a širokú škálu dostupných nastavení. Obsahuje i odporúčania pre nastavenie modelu s prítomnosťou varu, na ktoré bolo pri nastavovaní modelu prihliadnuté. Detailné nastavenie modelu možno vidieť v Tab. 19.

Tab. 19 - Detailné nastavenie Eulerovského modelu

<b>Model</b>	
<i>Viacfázový model</i>	Nehomogénny Eulerovský
<i>Formulácia objemového frakcie</i>	Implicitná
<i>Eulerovské parametre</i>	Model varu
<i>Voľba modelu varu</i>	RPI
<i>Medzifázové rozhranie</i>	Ostré/Dispergované
<b>Fázy</b>	
<i>Primárna fáza</i>	Voda
<i>Sekundárna fáza</i>	Para
<i>Priemer bublín sekundárnej fáze</i>	Priemer podľa varu
<b>Fázová interakcia – Sily</b>	
<i>Odporový súčiniteľ</i>	Ishii
<i>Súčiniteľ povrchového napätia</i>	Konštantný = 0,023976 N/m [34]
<i>Modelovanie povrchového napätia</i>	Áno
<i>Globálne možnosti modelu</i>	Kontinuálna povrchová sila
<b>Fázová interakcia – Teplo, hmota, reakcie</b>	
<i>Z fáze – do fáze</i>	Voda – Para
<i>Mechанизmus</i>	Var

<i>Saturačná teplota</i>	Konštantná = 531,93 K [34]
<i>Priemer odtrhnutia bublín</i>	Tolubinski-Kostanchuk
<i>Frekvencia odtrhnutia bublín</i>	Cole
<i>Súčiniteľ ovplyvnenej oblasti</i>	Delvalle-Kenning
<b>Fázová interakcia – Medzifázová oblasť</b>	
<i>Medzifázová oblasť</i>	Ia-ishii

Simulácia bola z dôvodu lepšej stability a inicializácie poľa najskôr spustená ako jednofázová. To znamená, že bola vypnutá rovnica objemového zlomku a ANSYS Fluent [1] tak nebral do úvahy sekundárnu fázu a jej interakciu s primárnou fázou. V tejto časti bolo Globálne Courantovo číslo nastavené na hodnotu 1.

Po inicializácii rýchlostného poľa v trvaní približne 50 časových krokov bola zapnutá rovnica objemového zlomku a úloha už bola počítaná ako dvojfázová. Courantovo číslo bolo znížené, ako odporúča zdroj [7], na hodnotu 0,25 z dôvodu zmenšenia časového kroku a teda lepšieho popisu v prvých momentoch simulácie. Po ustálení po približne 400 časových krokoch sa Courantovo číslo zvýšilo opäť na hodnotu 1. Po nasimulovaní 1050 časových krokov bol celkový vypočítaný čas 0,0154 s. Courantovo číslo bolo v tomto kroku zvýšené na manuálom [7] odporúčanú hodnotu 2. Pri tejto hodnote Courantovho čísla dosahovala veľkosť počiatočného časového kroku hodnotu 1,728e-05 s. Keďže implicitná formulácia umožňuje pri použití vyšších rádov diskretizácie pracovať aj vyššími hodnotami Courantovho čísla, jeho hodnota bola od časového kroku 3050 zvýšená na hodnotu 5. Z tohto popisu je teda okrem už spomínanej výpočtovej náročnosti zrejmá aj časová náročnosť viacfázových výpočtov, špeciálne u Eulerovského modelu. Konvergencia úlohy bola spočiatku nastavená pri hodnote rezíduí 1e-3, neskôr bola táto hodnota znížená na 1e-5 kvôli potrebe zníženia rozdielu vo výsledkoch hmotnostnej bilancie. Časový krok bol nastavený ako adaptívny s metódou „*Multiphase-Specific*“. Metóda špecifikácie doby ako prírastkový časový krok s počiatočnou veľkosťou 1e-5. V Tab. 20 sú uvedené použité diskretizačné schémy.

Tab. 20 - Diskretizačné schémy použité v Eulerovskom viacfázovom modeli

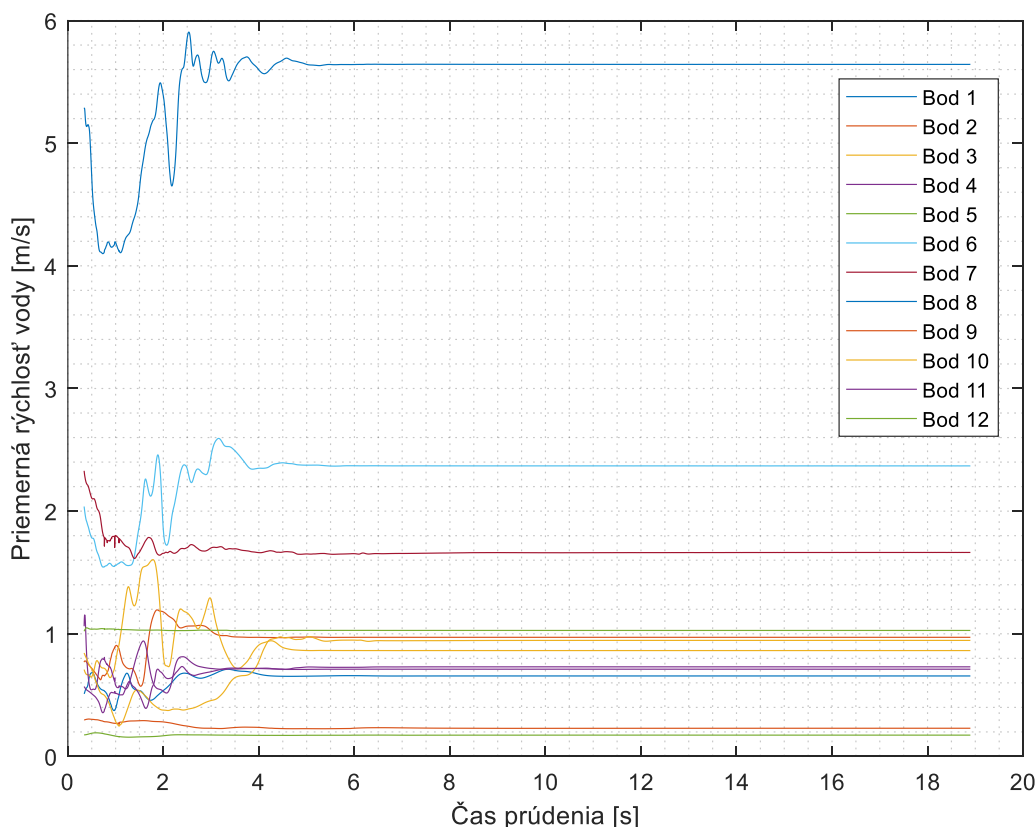
<b>Prepojenie tlaku-rýchlosti</b>	
<i>Schéma</i>	„Phase Coupled SIMPLE“
<b>Priestorová diskretizácia</b>	
<i>Gradient</i>	„Least Squares Cell Based“
<i>Tlaková diskretizácia</i>	„PRESTO!“
<i>Rovnica hybnosti</i>	„Second Order Upwind“
<i>Objemový zlomok</i>	„Modified HRIC“
<i>Turbulentná kinetická energia</i>	„Second Order Upwind“
<i>Rýchlosť turbulentného rozptýlenia</i>	„Second Order Upwind“
<i>Rovnica energie</i>	„Second Order Upwind“
<i>Tranzientná formulácia</i>	„Bounded Second Order Implicit“

## 7 Výsledky výpočtu

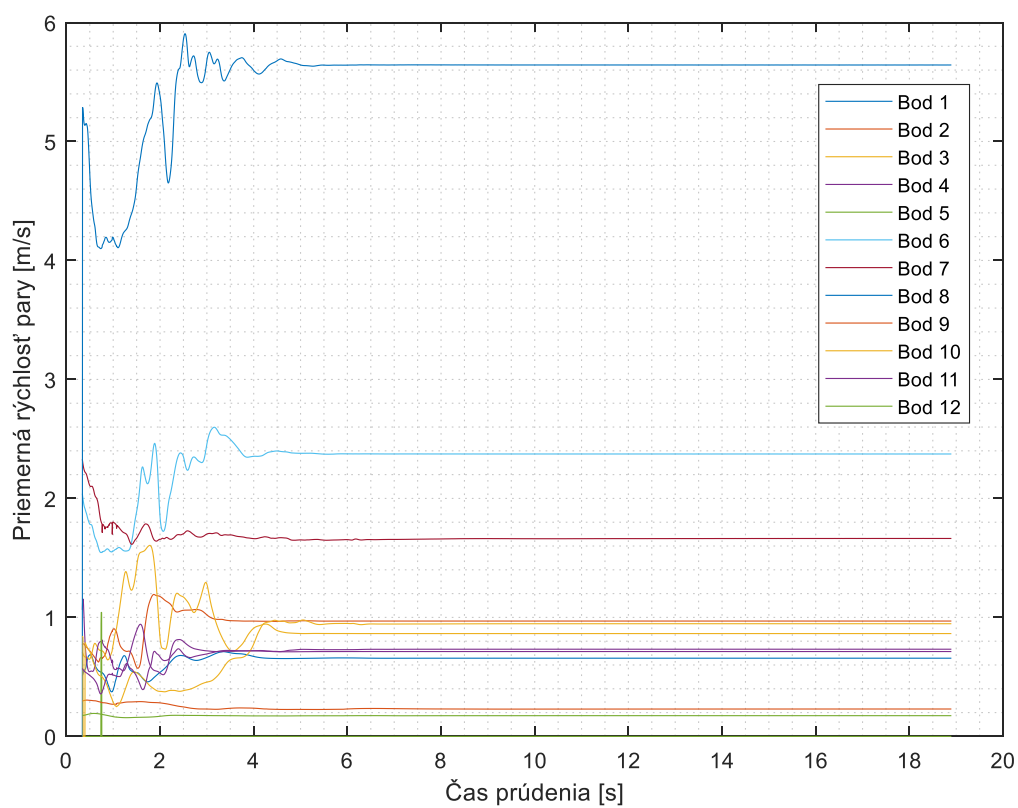
V tejto kapitole sú prezentované výsledky dvojfázového výpočtu pomocou Eulerovského viacfázového modelu. Výsledky tranzientného výpočtu je potrebné priebežne sledovať a posudzovať hodnoty. Sledovanými veličinami sú napríklad hodnoty hmotnostných rezíduí, ale aj rýchlosti a teploty v bodoch domény. V rámci tejto diplomovej práce bolo napočítaných 41 200 časových krokov, čo predstavuje približne 18,8 s celkového času prúdenia. Možno zhodnotiť, že priebehy rýchlostí (Obr. 39 a Obr. 40) a teplôt (Obr. 41) v rôznych bodoch domény boli v tomto časovom horizonte ustálené. Rezíduá hmotnostnej bilancie dosahujú úroveň  $1e-4$ . Údaje z hmotnostných bilancií sú zobrazené v Tab. 21.

Tab. 21 - Hmotnostná bilancia viacfázového modelu (údaje sú uvedené v [kg/s])

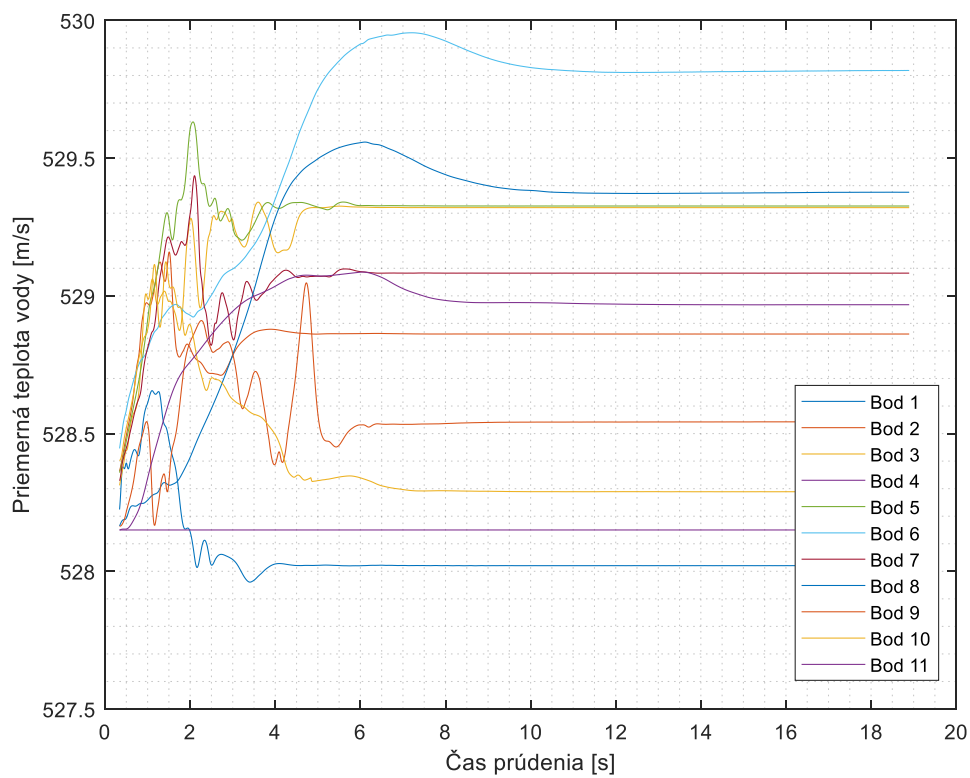
<b>Voda</b>	
Hmotnostný tok na vtoku central	1,746
Hmotnostný tok na vtoku MP	81,270
Hmotnostný tok na výtokoch	-82,933
Rozdiel v hmotnostnej bilancii	0,082
<b>Para</b>	
Hmotnostný tok na vtoku central	0
Hmotnostný tok na vtoku MP	4,279
Hmotnostný tok na výtokoch	-4,361
Rozdiel v hmotnostnej bilancii	-0,082
<b>Zmes</b>	
Rozdiel v hmotnostnej bilancii	-0,000187



Obr. 39 - Graf priemernej rýchlosti vody v rôznych bodoch domény



Obr. 40 - Graf priemernej rýchlosti pary v rôznych bodoch domény



Obr. 41 - Graf priemernej teploty vody v rôznych bodoch domény

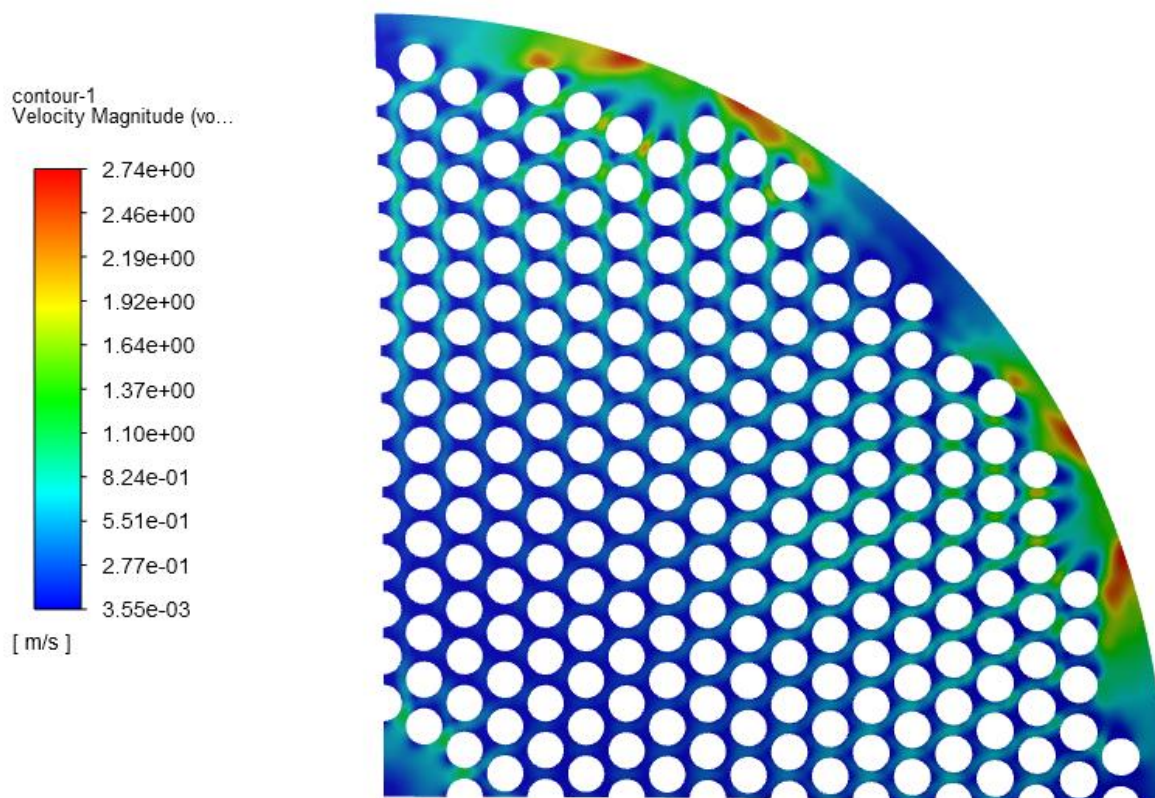


Z grafov možno vyčítať, že k ustáleniu rýchlostí došlo za približne 8 s, teploty vody boli ustálené po cca 13 s. Teplota pary nie je vykreslená, nakoľko model varu RPI uvažuje pre plynnú fázu saturačnú teplotu [7]. Jej teplota je teda konštantná. V Tab. 22 sú uvedené rýchlosti na vtokoch a výtokoch domény, ako aj maximálna rýchlosť vyskytujúca sa v celom objeme.

Tab. 22 - Rýchlosti na vtokoch a výtokoch (údaje sú uvedené v [m/s])

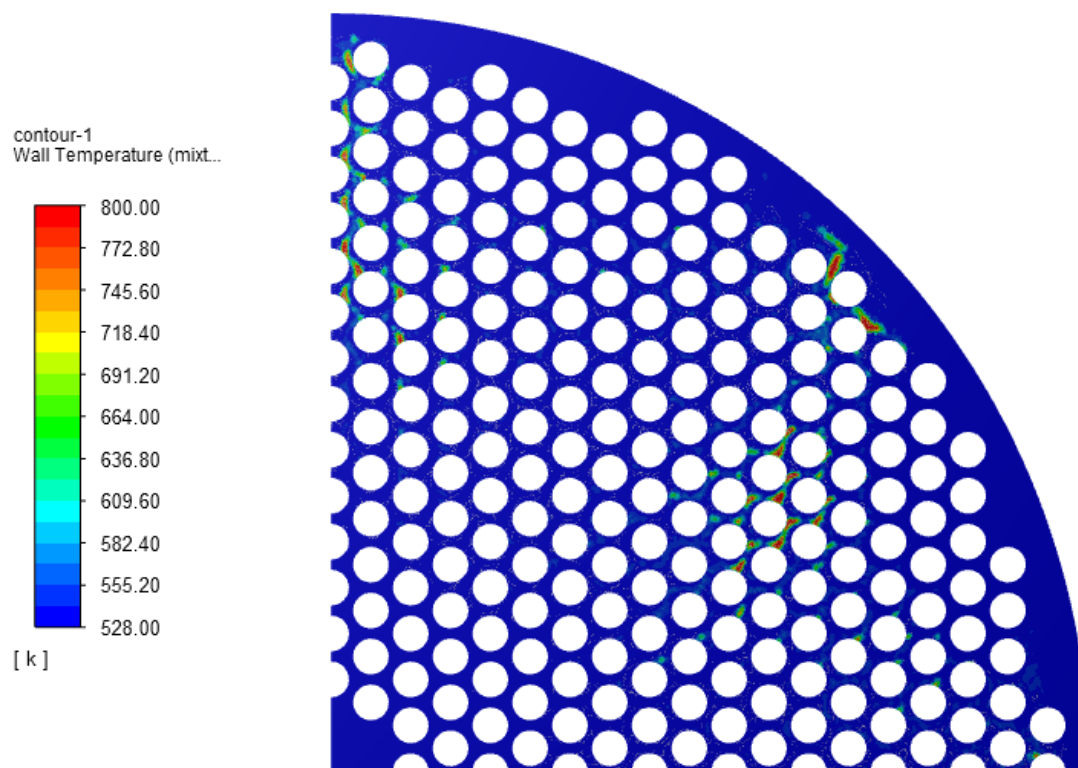
<b>Voda</b>	
Priemerná rýchlosť na vtoku central	0,992
Priemerná rýchlosť na vtoku MP	0,627
Priemerná rýchlosť na výtoku	1,686
<b>Para</b>	
Priemerná rýchlosť na vtoku central	0
Priemerná rýchlosť na vtoku MP	0,627
Priemerná rýchlosť na výtoku	1,686

Obr. 42 znázorňuje kontúru veľkosti rýchlosti kvapalnej fázy v blízkosti trubkovnice. Výsledky dvojfázovej simulácie sú podobné výsledkom steady-state simulácie, čo do rozloženia rýchlostí v tejto oblasti. Tranzientná simulácia lepšie zachytáva periodicity v toku. Zmenilo sa napríklad lokálne maximum rýchlosti, ktoré je teraz v oblasti spájania prúdov na výtokoch. V problémových miestach popísaných v podkapitole 4.5.2 si možno všimnúť veľmi nízke rýchlosti za trúbkami v smere prúdenia. Práve v týchto miestach sa vyskytovali slabé miesta zvarov. Nízka rýchlosť v týchto miestach navyše môže znamenať aj vyššie teploty.



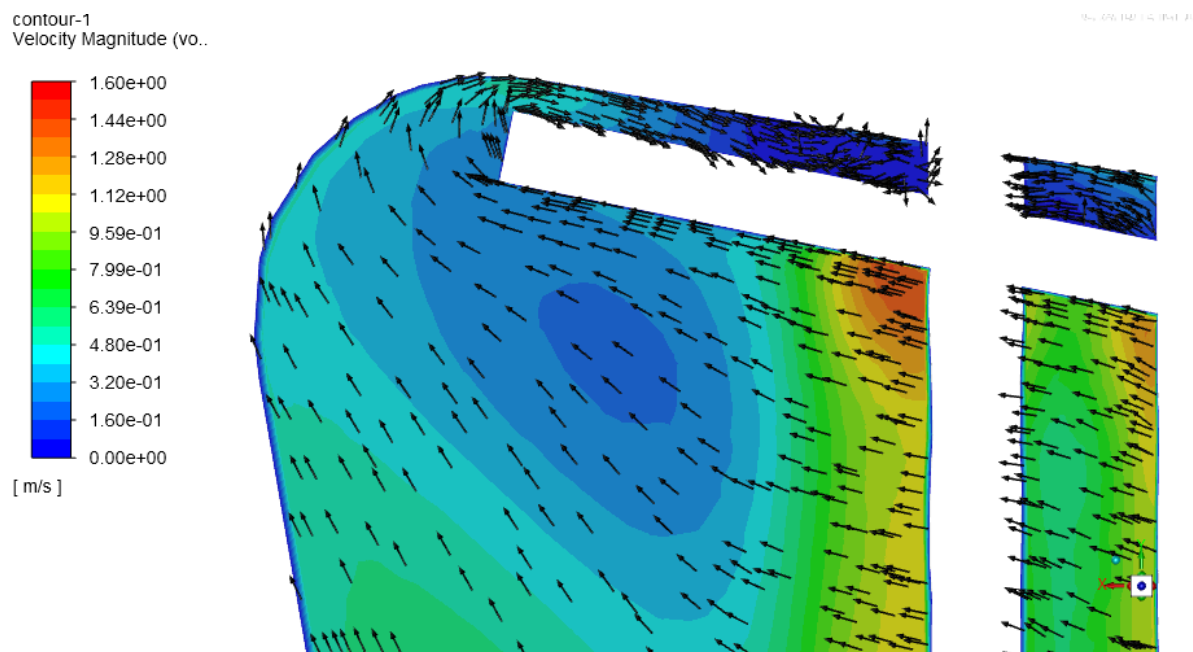
Obr. 42 - Rýchlosť prúdenia vody v blízkosti trubkovnice

Na Obr. 43 je znázornená teplota steny trubkovnice zaťaženej dvojfázovým prúdením. Na trubkovnici sú zreteľné oblasti lokálneho prehrievania steny. Toto prehrievanie sa vyskytuje na osi symetrie a v oblasti medzi výtokmi. Teda v oblastiach, kde podľa dostupných výsledkov pôsobia nižšie rýchlosti.



Obr. 43 - Teplota steny trubkovnice (teplotná mapa orezaná zo 1010 K na 800 K)

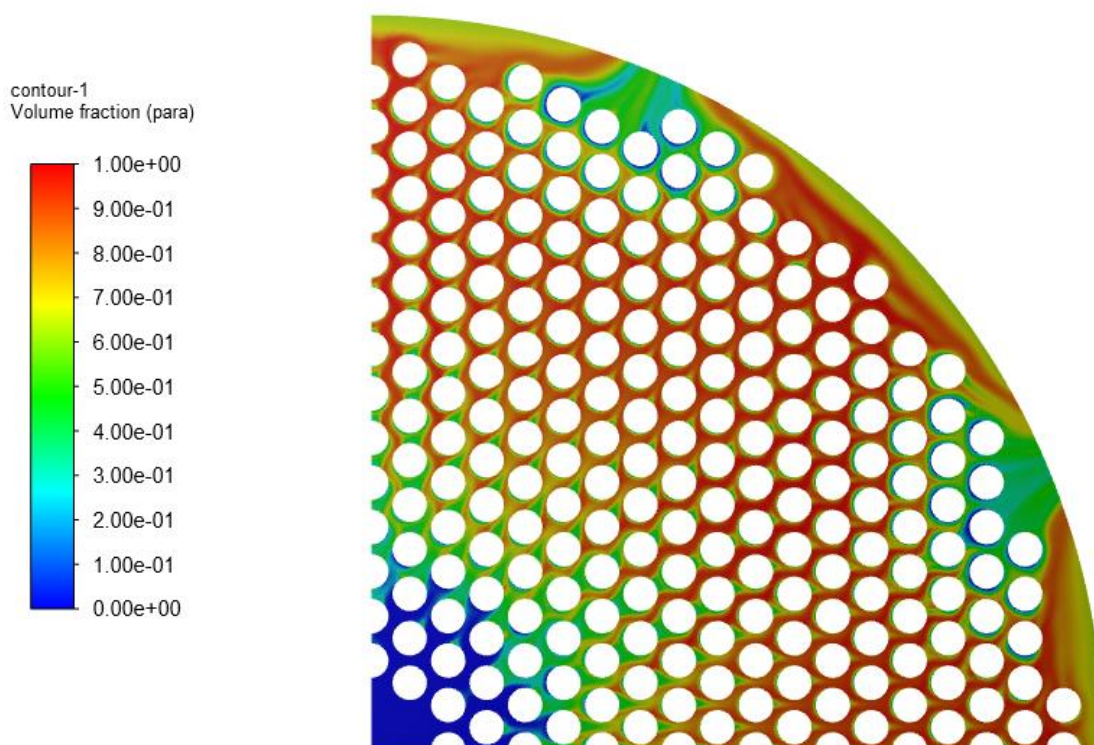
Ako ilustruje Obr. 44, prúd paro-kvapalnej zmesi zo spodnej časti výmenníka prúdi aj do oblasti medzi trubkovnicou a deliacim plechom. To môže značiť nedostatočný prítok chladiacej vody.



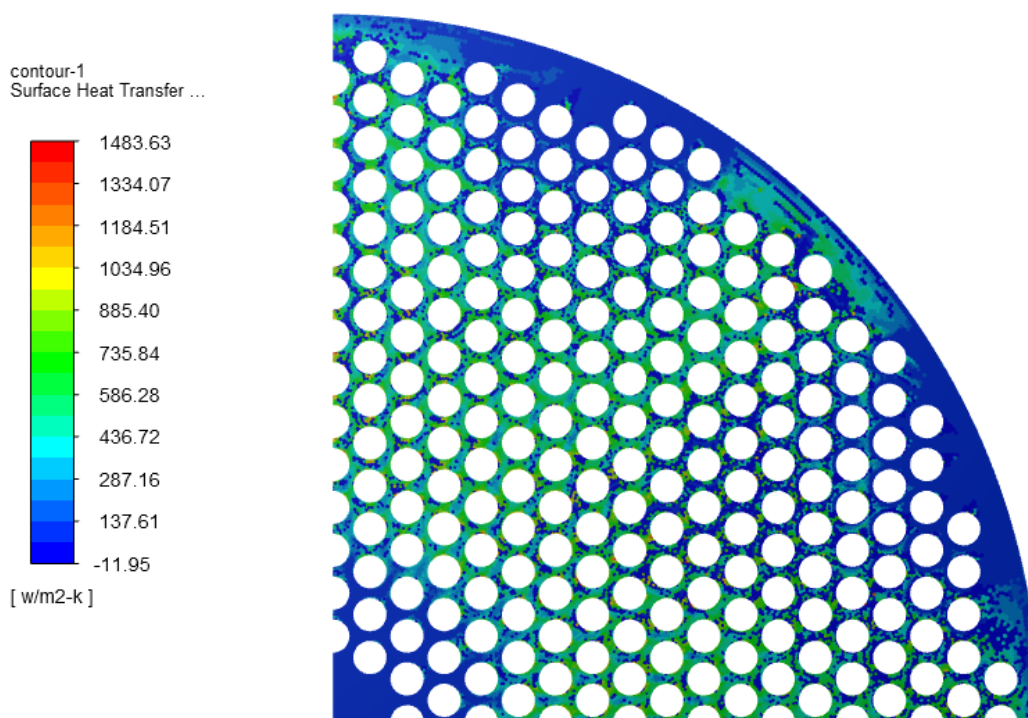
Obr. 44 - Detail oblasti stretu oboch prúdov



Parná fáza sa v riešenej oblasti vytvára najskôr vo forme tenkej vrstvy pri stene trubkovnice. Objemový zlomok vytvorenej parnej fázy na stene trubkovnice znázorňuje Obr. 45. Centrálnym vtokom vstupuje voda, v ktorej sa postupne začínajú tvoriť častice pary. Možno pozorovať kumuláciu parnej fázy, opäť v miestach domény s nízkou rýchlosťou.



Obr. 45 - Objemový zlomok pary na stene trubkovnice

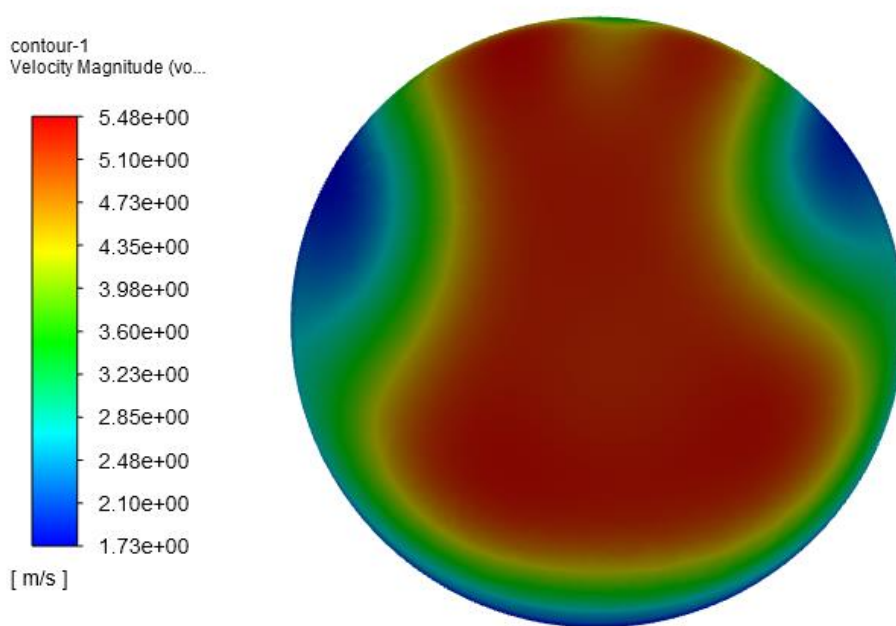


Obr. 46 - Povrchový súčiniteľ prestupu tepla na trubkovnici

Na Obr. 46 možno vidieť rozloženie povrchového súčiniteľa prestupu tepla po stene trubkovnice. Jeho hodnoty sú podstatne vyššie ako tomu bolo pri jednofázovom steady-state výpočte. Hodnoty priemerného a maximálneho povrchového súčiniteľa tepla na teplovýmenných plochách sú zobrazené v Tab. 23.

Tab. 23 - Hodnoty povrchového súčiniteľa prestupu tepla (údaje sú uvedené v  $[W/m^2 \cdot K]$ )

Plocha	Priemer	Maximum
Trubkovnica	330,137	1 483,631
Vrchné trubky	206,954	2 005,619
Spodné trubky+ferule	156,004	1 173,436
Spodné trubky	222,034	1 387,515



Obr. 47 - Rýchlosť vody na výtoku

Zvolená dĺžka je dostatočná, nevznikal backflow, neni parabolicky profil.

## Záver

Táto diplomová práca sa zaoberala problematikou viacfázového prúdenia a jeho distribúcie v trubkovom zväzku ako jednou z možných príčin praskania zvarov trubiek a trubkovnice v parnom generátore, ktorý je súčasťou kotla na prevádzke KD3 v chemickom podniku DUSLO, a.s.

V úvode práce bola spracovaná rešerš popisujúca var a jav dvojfázového prúdenia v technických aplikáciách, ďalej bol spracovaný prehľad dostupných výpočtových viacfázových modelov v programe ANSYS Fluent a rešerš doposiaľ publikovaných prác zameraných na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu. Následne bol predstavený predmetný kotol, popísané jeho prevádzkové podmienky a detailne priblížený problém riešený v rámci tejto diplomovej práce. V ďalšej časti práce nasledoval popis výpočtového modelu. Bol spísaný postup vytvárania 3D geometrického modelu a podrobný postup vytvárania výpočtovej siete. Boli uvedené okrajové podmienky a materiálový model.

Výpočtová časť sa opierala o steady-state jednofázový výpočet, ktorý jednak slúžil na vyladovanie kvality siete a okrajových podmienok, no zároveň ponúkol prvý náhľad do charakteristiky daného toku a predpovedal problémové miesta. Po vykonaní mnohých steady-state testovacích výpočtov bolo možné pristúpiť k nastaveniu dvojfázového modelu. Spočiatku bol zvolený VOF viacfázový model s využitím Leeho modelu varu. Po napočítaní približne 10 s ale bolo z výsledkov zrejmé, že daný model nepopisuje parnú fázu adekvátne. Bolo teda nutné pristúpiť k využitiu iného modelu. Zvolený bol Eulerovský model, ktorý je najkomplexnejší z dostupných viacfázových modelov, čo sa týka jeho nastavenia i množstva počítaných rovníc. S pomocou zdroja [7] bol teda model nastavený a spustený.

Výsledky dvojfázového tranzientného výpočtu do veľkej miery potvrdili výsledky získané už zo steady-state výpočtov. Výsledky ukazujú, že vo výpočtovej doméne sa objavujú miesta s nižšími rýchlosťami prúdenia, ktoré sa môžu pri tak veľkom tepelnom zaťažení nitroznymi plynmi prehrievať. Navyše je v práci uvedený aj ďalší faktor prispievajúci k prevádzkovým problémom, a tým je nesprávne prevedenie zvarových spojov. Príčin vzniknutých porúch teda môže byť niekoľko, s najväčšou pravdepodobnosťou sa však jedná o kombináciu viacerých faktorov.

Oblasti, ktoré sú problémové v reálnom zariadení boli i na základe výpočtu vyhodnotené ako rizikové. Sú to miesta, kde dochádza k nízkym rýchlostiam v prúdení, následkom čoho sú tu pozorované vysoké teploty. Výsledky ukazujú na nerovnomerné teplotné zaťaženie v oblasti pod trubkovnicou. Jedná sa teda o dizajnový nedostatok, ktorý je potrebné riešiť konštrukčným zásahom. Aj pokiaľ bol výmenník prevádzkovaný v rámci svojich prevádzkových podmienok, poruchám sa zrejme nedalo predísť. Možným konštrukčným riešením pre nové zariadenia je zväčšiť rozostupy medzi trúbkami, eventuálne zvýšiť prietok chladiacej vody prostrednou rúrou a zväčšiť tak rýchlosti v riešenej oblasti a zároveň minimalizovať spätný tok objavujúci sa v zúžení. Bilančne pripadá ešte do úvahy znížiť teplotu nitrozných plynov, no toto opatrenie môže byť problematické z technologického hľadiska.



## Zoznam použitých zdrojov

- [1] ANSYS, INC. *ANSYS® Fluent, 2021 R1* [online]. B.m.: ANSYS, Inc., nedatováno. Dostupné z: <http://www.ansys.com>
- [2] TONG, L.S. a Y.S. TANG. *Boiling Heat Transfer And Two-Phase Flow*. B.m.: Taylor&Francis, 1997. Second. ISBN 1-56032-458-6.
- [3] PENG, Jing, Deqi CHEN, Jianjun XU, Lian HU a Hanzhou LIU. CFD simulation focusing on void distribution of subcooled flow boiling in circular tube under rolling condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2020, **156**, 119790. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119790
- [4] STEHLÍK, Petr. Two-Phase Flow. In: . Ústav procesního inženýrství VUT v Brne. 30. říjen 2016.
- [5] *Meshing -- CFD-Wiki, the free CFD reference* [online]. [vid. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Meshing>
- [6] THOMPSON, Joe F., Bharat K. SONI a Nigel P. WEATHERILL. *Handbook of Grid Generation*. B.m.: CRC Press, 1998. ISBN 978-1-4200-5034-9.
- [7] ANSYS, INC. *ANSYS Fluent Theory Guide v2021* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <http://www.ansys.com>
- [8] ANSYS, INC. *ANSYS Fluent User's Guide v2021* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <http://www.ansys.com>
- [9] SALEEM, Abdullah, Shamsuzzaman FAROOQ, Iftekhar A. KARIMI a Raja BANERJEE. Wall superheat at the incipient nucleate boiling condition for natural and forced convection: A CFD approach. *Computers & Chemical Engineering* [online]. 2020, **134**, 106718. ISSN 0098-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.compchemeng.2019.106718
- [10] POTHUKUCHI, Harish, S. KELM, B. S. V. PATNAIK, B. V. S. S. PRASAD a H. - J. ALLELEIN. CFD modeling of critical heat flux in flow boiling: Validation and assessment of closure models. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **150**, 651–665. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.01.030
- [11] WANG, Xiaoyuan, Yinfeng WANG, Haijun CHEN a Yuezhao ZHU. A combined CFD/visualization investigation of heat transfer behaviors during geyser boiling in two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2018, **121**, 703–714. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.005
- [12] SOLEIMANI, Ali, Amirmohammad SATTARI a Pedram HANAFIZADEH. Thermal analysis of a microchannel heat sink cooled by two-phase flow boiling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HFE-7100 nanofluid. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 2020, **20**, 100693. ISSN 2451-9049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2020.100693
- [13] ZHANG, Rui, Tenglong CONG, Wenxi TIAN, Suizheng QIU a Guanghui SU. Effects of turbulence models on forced convection subcooled boiling in vertical pipe. *Annals of*

- Nuclear Energy* [online]. 2015, **80**, 293–302. ISSN 0306-4549. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2015.01.039
- [14] IOILEV, A., M. SAMIGULIN, V. USTINENKO, P. KUCHEROVA, A. TENTNER, Simon LO a A. SPLAWSKI. Advances in the modeling of cladding heat transfer and critical heat flux in boiling water reactor fuel assemblies. *Proceedings - 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-12*. 2007.
- [15] *TTR pre výrobu kyseliny dusičnej 60%*. Technická správa. 2. Šaľa: DUSLO a. s. 2012.
- [16] VINCE, Tomáš. *Návrh konštrukčných zmien parného bubna pre vyšší tlak* [online]. B.m., 2019 [vid. 2021-05-18]. b.n. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=117009](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=117009)
- [17] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER - GENERAL ARRANGEMENT*. 21. květen 2015
- [18] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER BURNER HOOD*. 1. prosinec 2015
- [19] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER, SUPERHEATER, WALL COILS*. 22. říjen 2015
- [20] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *Process Data WHB*. 7. listopad 2015
- [21] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *P&I Diagramm*. 21. květen 2015
- [22] STEHLÍK, Petr. Selection of Heat Exchangers. In: . Ústav procesního inženýrství VUT v Brně. 31. říjen 2013.
- [23] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER, UPPER TUBESHEET*. 24. listopad 2015
- [24] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER, ASSEMBLY DRAWING SHEET III, DETAILS*. 17. listopad 2015
- [25] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER, FLOW PLATE*. 24. listopad 2015
- [26] *Archív firmy DUSLO, a.s., Šaľa*. 2020.
- [27] VALÁŠEK, Jiří, David KRPALEK a Zdeněk FLORIAN. *Tvorba výpočtového modelu v programu ANSYS*. 2011
- [28] DASSAULT SYSTÈMES. *SOLIDWORKS* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.solidworks.com/>
- [29] CHAITANYA, Author Krishna. Boundary-Layer Modeling using Inflation Layers. *SIMULATE TOMORROW!* [online]. 4. červenec 2017 [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.cadfem.in/blog/modeling-boundary-layer-inflation/>

- 
- [30] ANSYS, INC. *Introduction to ANSYS Fluent-Lecture 9: Best Practice Guidelines* [online]. 18. duben 2016. Dostupné z: <https://www.kth.se/social/files/57149285f27654646b25d53b/05-Quality-ANSYS.pdf>
- [31] What is the best value of Maximum Aspect Ratio in Ansys Fluent? Is there any effect on converging from this value? *ResearchGate* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/post/What-is-the-best-value-of-Maximum-Aspect-Ratio-in-Ansys-Fluent-Is-there-any-effect-on-converging-from-this-value>
- [32] *What y+ should I use? Part 3 – Understanding impact of Y+ and number of prism layers on flow resolution / Computational Fluid Dynamics (CFD) Blog – LEAP Australia & New Zealand* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: [https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus\\_part3\\_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/](https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus_part3_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/)
- [33] *(4) Understanding Y+ for CFD Simulations / LinkedIn* [online]. [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-y-cfd-simulation-sijal-ahmed/>
- [34] *Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam* [online]. Suite Burlington, Ma 01803 USA: ChemicalLogic, nedatováno. Dostupné z: [www.chemicallogic.com](http://www.chemicallogic.com)
- [35] *EN 1.5415 (16Mo3) Steel :: MakeItFrom.com* [online]. [vid. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.5415-16Mo3-Steel>
- [36] *EN 1.7335 (13CrMo4-5) Chromium-Molybdenum Steel :: MakeItFrom.com* [online]. [vid. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.7335-13CrMo4-5-Chromium-Molybdenum--Steel>
- [37] What Are Boundary Conditions? Numerics Background. *SimScale* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-boundary-conditions/>
- [38] ŠIDLOF, Petr. Implementace metody konečných objemů pro nestlačitelné Navier-Stokesovy rovnice v knihovně OpenFOAM. In: . Technická univerzita v Liberci.
- [39] *ČSN EN ISO 772 - Courantova podmínka - nlnorm.cz* [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/67524>





## Zoznam použitých obrázkov

Obr. 1 - Režimy dvojfázového prúdenia vo vertikálnom toku (a) a v horizontálnom toku (b) [2] .....	7
Obr. 2 - Režimy prúdenia v diabatickom toku (1 – jednofázová kvapalina, 2 – bublinkový tok; 3 – zátkový tok; 4 – piestový tok; 5 – vlnivý tok; 6 – prstencový tok) [2] .....	8
Obr. 3 - Režimy prúdenia vo vertikálnom ohrievanom kanále [2] .....	9
Obr. 4 - Diagram varu [7] .....	14
Obr. 5 - Schéma parného generátora na KD3 [17] .....	22
Obr. 6 – Horák a spaľovacia komora kotla KD3 [18] .....	23
Obr. 7 – Prehrievač pary v kotlovom systéme KD3 [19] .....	24
Obr. 8 - Systém cirkulácie kotlovej vody [21] .....	25
Obr. 9 – Oblasť vrchnej trubkovnice kotla na KD3 s vyznačeným potrubím prívodu chladiacej vody k trubkovnici [17] .....	26
Obr. 10 - Detail vrchnej trubkovnice a deliaceho plechu [25] .....	26
Obr. 11 - Rozloženie trubiek a hrdiel stúpačiek na kotli KD3 [17] .....	26
Obr. 12 - Spojenie trubiek a trubkovnice [24] .....	27
Obr. 13 - Rez spoja trubky a trubkovnice [26] .....	27
Obr. 14 - Zvar trubky a trubkovnice (pohľad 1) [26] .....	28
Obr. 15 - Zvar trubky a trubkovnice (pohľad 2) [26] .....	28
Obr. 16 - Schéma poškodenia trubiek v čase (1) [26] .....	29
Obr. 17 - Schéma poškodenia trubiek v čase (2) [26] .....	30
Obr. 18 - Izometrický pohľad 3D modelu v programe SOLIDWORKS .....	31
Obr. 19 - Predný pohľad 3D modelu v programe SOLIDWORKS s vyznačením zúženého miesta stretu prúdov .....	32
Obr. 20 - Pohľad zhora na 3D model v programe SOLIDWORKS .....	33
Obr. 21 – Schéma ferule .....	34
Obr. 22 - Upravený model s rozdelením plochy spodných trubiek .....	35
Obr. 23 - Výpočtová sieť modelu .....	36
Obr. 24 - Objemová sieť modelu v reze rovinou XY .....	37
Obr. 25 - Objemová sieť v reze rovinou XZ .....	38
Obr. 26 - Detail reznej roviny .....	39
Obr. 27 - Graf teplôt v bode (1) domény pri rozličných sieťach .....	40
Obr. 28 – Graf teplôt v bode (2) domény pri rozličných sieťach .....	40
Obr. 29 – Graf teplôt v bode (3) domény pri rozličných sieťach .....	41
Obr. 30 - Rozdielna veľkosť siete v oblasti nad a pod deliacim plechom .....	41
Obr. 31 - Graf vývoja rýchlostí v jednotlivých bodoch domény .....	48
Obr. 32 - Graf vývoja teplôt v jednotlivých bodoch domény .....	48
Obr. 33 - Rýchlosť prúdenia v blízkosti trubkovnice .....	49
Obr. 34 - Teplota na stene trubkovnice .....	49
Obr. 35 - Tepelný tok trubkovnicou .....	50
Obr. 36 - Súčiniteľ prestupu tepla na povrchu trubkovnice .....	50
Obr. 37 - Tepelný tok trubkami .....	51
Obr. 38 - Hondoty $y^+$ na stene trubkovnice .....	51

---

Obr. 39 - Graf priemernej rýchlosti vody v rôznych bodoch domény .....	55
Obr. 40 - Graf priemernej rýchlosti pary v rôznych bodoch domény .....	56
Obr. 41 - Graf priemernej teploty vody v rôznych bodoch domény .....	56
Obr. 42 - Rýchlosť prúdenia vody v blízkosti trubkovnice .....	57
Obr. 43 - Teplota steny trubkovnice (teplotná mapa orezaná zo 1010 K na 800 K) .....	58
Obr. 44 - Detail oblasti stretu oboch prúdov .....	58
Obr. 45 - Objemový zlomok pary na stene trubkovnice.....	59
Obr. 46 - Povrchový súčiniteľ prestupu tepla na trubkovnici .....	59
Obr. 47 - Rýchlosť vody na výtoku .....	60

## Zoznam použitých tabuliek

Tab. 1 - Súhrn prác zameriavajúcich sa na dvojfázové prúdenie s prítomnosťou varu .....	15
Tab. 2 - Okrajové podmienky použité v štúdiu [3] .....	15
Tab. 3 - Skúmané siete v štúdiu [10] .....	17
Tab. 4 - Okrajové podmienky v štúdiu [10] .....	17
Tab. 5 - Siete použité v štúdiu [12] .....	18
Tab. 6 - Diskretizačné schémy VOF modelu použité v štúdiu [12] .....	19
Tab. 7 - Siete vytvorené v štúdiu [13] .....	19
Tab. 8 - Charakteristiky výpočtových sietí.....	38
Tab. 9 – Rozsahy lokálneho zjemnenia použité pri tvorbe povrchovej siete .....	38
Tab. 10 - Proporcie fluidných materiálov [34] .....	42
Tab. 11 - Proporcie pevných materiálov [35, 36].....	42
Tab. 12 - Okrajové podmienky na vstupe (inlet) .....	43
Tab. 13 - Okrajové podmienky na výstupe (outlet) .....	43
<i>Tab. 14 - Okrajové podmienky na stenách .....</i>	<i>43</i>
Tab. 15 - Termálne okrajové podmienky na diabatických stenách .....	43
Tab. 16 - Diskretizačné metódy použité pre Steady-state výpočty .....	47
Tab. 17 - Hmotnostná bilancia steady-state úlohy ( údaje sú v [kg/s]) .....	47
Tab. 18 - Tepelná bilancia trubiek pri steady-state úlohe (údaje sú vo wattoch [W]) .....	47
Tab. 19 - Detailné nastavenie Eulerovského modelu .....	53
Tab. 20 - Diskretizačné schémy použité v Eulerovskom viacfázovom modeli.....	54
Tab. 21 - Hmotnostná bilancia viacfázového modelu (údaje sú uvedené v [kg/s]).....	55
Tab. 22 - Rýchlosti na vstupoch a výtokoch (údaje sú uvedené v [m/s]) .....	57
Tab. 23 - Hodnoty povrchového súčiniteľa prechodu tepla (údaje sú uvedené v [W/m <sup>2</sup> ·K])....	60



## Zoznam použitých skratiek a symbolov

Symbol	Význam	Jednotka
$A_c$	celková teplovýmenná plocha	[m <sup>2</sup> ]
$A_m$	teplovýmenná plocha trubiek modelu	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha_v$	objemový zlomok parnej fáze	[-]
$\dot{m}_{lv}, \dot{m}_{vl}$	hodnota prestupu hmoty z dôvodu vyparovania, respektíve kondenzácie	[kg/s/m <sup>3</sup> ]
HOTR	High Order Term Relaxation	[-]
$\dot{q}$	merný tepelný výkon	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{conv,l}$	konvektívny prestup tepla do kvapalnej fáze	[W]
$q_{quen}$	kaliaci tepelný tok	[W]
$q_{evap}$	výparný tepelný tok	[W]
$q_{conv,g}$	konvektívny prestup tepla do plynnej fáze	[W]
$\dot{Q}_c$	celkový tepelný výkon	[W]
$\dot{Q}_m$	tepelný výkon modelu	[W]
$\Delta\dot{Q}$	rozdiel tepelných výkonov	[W]
$\nu$	lokálna kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
$\vec{V}_v$	rýchlosť parnej fáze	[m <sup>3</sup> /s]
$u_*$	trecia rýchlosť na stene	[m/s]
$y$	vzdialenosť od steny domény	[m]
$y^+$	veličina vyjadrujúca veľkosť prvej bunky na stene	[-]
$\rho_v$	hustota pár	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dolné indexy		
$v$	parná fáza	[-]



---

**Zoznam použitých značiek chemických prvkov a zlúčenín**

<i>Prvok / zlúčenina</i>	<i>Názov</i>
Pt	platina
Rh	rhódium
Pd	paládium
NH <sub>3</sub>	amoniak
O <sub>2</sub>	molekulový kyslík
NO	oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	všeobecný oxid dusíka
N <sub>2</sub> O	oxid dusný
H <sub>2</sub> O	voda
• NH	imidový radikál





## **Zoznam príloh**

Príloha 1 – Fotodokumentácia k riešenému aparátu



# Príloha 1

Fotodokumentácia k riešenému aparátu [26]

